

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA



TRABAJO DIRIGIDO

EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE ABSORCION DE CO₂
CON UN PROCESO MECANICO, PARA LA NEUTRALIZACION
DE AGUAS RESIDUALES DE “INDUSTRIAS ALBUS S.A.”

Trabajo Dirigido para obtener el Grado de Ingeniero Químico

POR: CYNTHIA BELEN CHAVEZ AGUILAR

TUTORES: ING. SANTIAGO MORALES MALDONADO PhD
ING. MILTON QUISBERT SANCHEZ

LA PAZ – BOLIVIA

FEBRERO, 2023



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

Con mucho cariño, a mi madre Lucy Aguilar, por su apoyo, paciencia, comprensión y por ser el pilar de mi familia.

A mis hermanos Ariel, Joel y Víctor, por su cariño, confianza y soporte que trascienden el tiempo.

AGRADECIMIENTOS

A INDUSTRIAS ALBUS S.A. por brindarme la oportunidad y herramientas necesarias para realizar este trabajo.

A mis tutores, los ingenieros Milton Quisbert Sánchez y Santiago Morales que, con su vasta experiencia y conocimiento me guiaron, orientaron y aportaron bastante en la realización de este proyecto.

Al ingeniero Víctor Yana que es parte activa de la empresa, por su colaboración, guía y amistad que me orientaron en el transcurso.

Al licenciado Edwin Ríos (†) que en vida fue un padre ejemplar, gran persona y modelo a seguir.

Al ingeniero Daniel Ríos por el apoyo y asesoría brindados en el proceso.

RESUMEN

El presente trabajo evalúa la capacidad de absorción del CO₂ en el agua residual alcalina generada en Industrias ALBUS S.A. a través de un proceso mecánico, esta industria se dedica a la elaboración de algodón hidrófilo, gasa y vendas de uso médico, sin embargo, en sus procesos de blanqueo y descrude de materia prima emplea compuestos químicos de carácter básico como ser: Hidróxido de Sodio y carbonato de sodio, los cuales son los responsables de la alcalinidad de sus efluentes residuales, con valores de pH que oscilan entre 10.5 y 12.05, parámetro que, junto a la cantidad de Sólidos suspendidos totales presentes se encuentran fuera de los límites máximos permisibles estipulados en el Reglamento En Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 de nuestro país.

Por lo tanto, se pretende proponer una alternativa diferente al tratamiento de aguas residuales empleado actualmente en esta Industria, la cual consiste en la adición excesiva de coagulante que, aparte de aglutinar las partículas sólidas presentes, también disminuye el carácter básico de las mismas; Por ello, se propone un equipo adecuado para la absorción de gases en líquidos poco viscosos como es el caso y se realizan pruebas de disolución de CO₂ en el agua residual, este gas al estar en contacto con agua, se convierte en CO₂ acuoso, el cual pasa a ser ácido carbónico y es responsable de disminuir la alcalinidad del agua residual, las pruebas se realizan a distintas temperaturas para hallar los parámetros adecuados para este proceso y posteriormente se determina el porcentaje de disminución de la cantidad de coagulante respecto al proceso actual.

ABSTRACT

The present work evaluates the absorption capacity of CO₂ in the alkaline residual water generated in Industrias ALBUS S.A. Through a mechanical process, this industry is dedicated to the production of hydrophilic cotton, gauze and bandages for medical use, however, in its bleaching and raw material scouring processes it uses basic chemical compounds such as: Sodium Hydroxide and sodium carbonate, which are responsible for the alkalinity of its residual effluents, with pH values that range between 10.5 and 12.05, a parameter that, together with the amount of total suspended solids present, are outside the stipulated maximum permissible limits. in the Regulation Regarding Water Pollution of Law 1333 of our country.

Therefore, it is intended to propose a different alternative to the treatment of wastewater currently used in this Industry, which consists of the excessive addition of coagulant that, apart from binding the solid particles present, also reduces their basic character; For this reason, suitable equipment is proposed for the absorption of gases in low-viscosity liquids, as is the case, and tests are carried out on the dissolution of CO₂ in the wastewater, this gas, when in contact with water, becomes aqueous CO₂, the which happens to be carbonic acid and is responsible for reducing the alkalinity of the residual water, the tests are carried out at different temperatures to find the appropriate parameters for this process and later the percentage of decrease in the amount of coagulant with respect to the current process is determined.

INDICE GENERAL

RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
1. CAPITULO 1.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	3
1.3. Planteamiento del problema	4
1.4. Justificación General	7
1.4.1. Justificación Académica	7
1.4.2. Justificación Social	8
1.4.3. Justificación Ambiental	8
1.4.4. Justificación Técnica	8
1.4.5. Justificación Económica	8
1.5. Objetivo General	8
1.6. Objetivos Específicos:.....	8
CAPITULO 2.....	10
2. Marco teórico	10
2.1. Conceptualización de términos usados en tratamiento de aguas residuales.....	10
2.1.1. Aguas Residuales Crudas	10

2.1.2. Aguas Residuales Tratadas	10
2.1.3. Agua Alcalina	10
2.1.4. Potencial hidrógeno (pH).....	10
2.1.5. Demanda química de oxígeno (DQO)	11
2.1.6. Contaminación de Aguas.....	11
2.1.7. Demanda biológica de oxígeno (DBO)	11
2.1.8. Demanda biológica de oxígeno (DBO ₅).....	11
2.1.9. Sólidos en suspensión totales	11
2.1.10. Efluente Industrial	12
2.1.11. Efluente Contaminado	12
2.1.12. Limite Permisible	12
2.2. Calidad de Agua.....	12
2.2.1. El Concepto de Calidad de Agua.....	12
2.2.2. Clasificación de Cuerpos de Agua.....	12
2.2.3. Parámetros permitidos de descargas líquidas en cuerpos de agua.....	13
2.3. Ley de Henry	15
2.4. El dióxido de carbono	16
2.4.1. Propiedades químicas	16
2.4.2. Propiedades físicas	17
2.4.3. Cambios en sus Estados Físicos	17

2.4.4. Efectos Fisiológicos.....	18
2.4.5. Cilindros de CO ₂	18
2.4.6. Solubilidad del dióxido de carbono en agua.....	19
2.4.7. El dióxido de carbono en el agua.....	19
2.5. Operaciones Gas-Líquido.....	24
2.5.1. Equipos para operaciones Gas-Líquido.....	24
2.5.2. Agitación Mecánica, Contacto Gas-Líquido	24
2.6. Tratamiento de aguas residuales	34
2.6.1. Tratamiento Primario.....	34
CAPITULO 3.....	38
3. Caracterización de las Aguas Residuales.....	38
3.1. Recolección e identificación de muestras	38
3.1.1. Metodología de recolección de muestras.....	38
3.2. Caracterización de Muestras	40
CAPITULO 4.....	41
4. Disminución del pH de las aguas residuales alcalinas con adición de CO ₂	41
4.1. Metodología de dosificación	41
4.2. Dosificación de CO ₂	41
4.2.1. Demanda de CO ₂ en la primera fase.....	45
4.2.2. Demanda de CO ₂ en la segunda fase.....	49

CAPITULO 5	51
5. Propuesta de un equipo adecuado para la mayor dispersión de CO ₂ en el agua residual	51
5.1. Dimensiones estándar para equipos de agitación.....	51
5.1.1. Agitador	51
5.1.2. Altura de aletas del rodete	52
5.1.3. Distancia entre la base del tanque y el rodete.....	52
5.1.4. Distancia entre los baffles y la base del tanque	52
5.1.5. Ancho de baffle	52
5.1.6. Separación entre los baffles y la pared del tanque.....	53
5.2. Metodología	53
5.3. Propuesta de Equipo de Agitación	54
5.3.1. Tanque para pruebas	54
5.3.2. Dimensiones del tanque base para implementar el equipo de dispersión de CO ₂	54
5.3.3. Dimensiones propuestas para el equipo mecánico y dispersor de gas	56
5.3.4. Esquema propuesto.....	59
CAPITULO 6.....	60
6. Armado del Equipo Propuesto	60
6.1. Implementación del equipo para neutralización.....	60
6.1.1. Nuevas atribuciones para el equipo de neutralización.....	60
CAPITULO 7.....	63

7. Determinación de las condiciones de operación óptimas para el proceso	63
7.1. Cálculos en la Dosificación del CO ₂	63
7.1.1. Ley de Henry	63
7.2. Cálculos teóricos de concentración de CO ₂ para las muestras recolectadas	65
7.3. Masa de CO ₂ teórico requerido a distintas temperaturas	65
7.4. Eficiencia de la Absorción de CO ₂ en el agua residual.....	66
7.5. Determinación de las Condiciones óptimas de operación.....	67
7.5.1. Análisis de Varianza de dos factores con una sola muestra por grupo.....	67
7.5.2. Aplicación del Método	69
CAPITULO 8.....	71
8. Determinación de la cantidad de CO ₂ necesario para la neutralización de 1 m ³ de agua residual alcalina	71
CAPITULO 9.....	74
9. Determinación de la cantidad de coagulante usado actualmente y después del proceso de neutralización con CO ₂	74
9.1. Clarificación del agua.....	74
9.1.1. Coagulación.....	74
9.1.2. Floculación	75
9.1.3. Sedimentación	75
9.1.4. Coagulante Sulfato férrico.....	75

9.2. Metodología del procedimiento de coagulación y floculación	76
9.3. Dosificación de coagulante al agua residual neutralizada.....	76
9.4. Análisis de Laboratorio de Sólidos Suspendedos del agua neutralizada con adición de coagulante y floculante.....	78
9.5. Determinación de la cantidad de coagulante usado antes y después de la neutralización con CO ₂	79
9.5.1. Cantidad de coagulante usado actualmente	79
9.5.2. Cantidad de coagulante empleado después del proceso de neutralización.....	80
9.5.3. Agua Residual alcalina generada en INDUSTRIAS ALBUS S.A.....	80
9.5.4. Resumen de la cantidad de Coagulante empleado en ambos procesos	81
9.5.5. Porcentaje de coagulante reducido por el proceso de neutralización	81
CAPITULO 10.....	82
10. Análisis de Costos.....	82
10.1. Pronóstico de costos de CO ₂ y Coagulante para el proceso de Neutralización	82
10.1.1. Demanda en volumen de CO ₂ y coagulante respecto al requerimiento del agua residual.....	82
10.1.2. Pronóstico de Costos del CO ₂ y Coagulante para el proceso de Neutralización.....	82
10.1.3. Costos respecto a la cantidad de coagulante y floculante usados actualmente	83
10.2. Costos Fijos	84
10.3. Costos Variables.....	84

10.4. Análisis de Costos	85
10.4.1. Costo Total (D).....	86
10.4.2. Gastos Generales (E)	86
10.4.3. Utilidad (F)	86
10.4.4. Impuestos a las transacciones (G)	86
10.4.5. Costo total de precio unitario para aplicación	87
10.4.6. Insumos (A)	87
10.4.7. Mano de Obra (B).....	88
10.4.8. Herramientas y Equipo (C).....	88
10.4.9. Cálculos	89
CAPITULO 11	90
11. Conclusiones y Recomendaciones	90
11.1. Conclusiones	90
11.2. Recomendaciones.....	92
12. Bibliografía	93
13. Anexos	95
Anexo A – Informe de Análisis de Agua UMSA	95
Anexo B – Informe de Análisis de Agua EPSAS	96
Anexo C – Informe de Análisis de Agua EPSAS	97
ANEXO D – Diagrama de Recolección de Muestras	98

ANEXO E – Muestra de Agua Residual.....	99
ANEXO F – Flujograma del Procedimiento de neutralización con CO ₂	100
ANEXO G – Flujograma de propuesta de equipo.....	101
ANEXO H – Flujograma del tratamiento de clarificación.....	102
ANEXO I - Muestra de agua residual neutralizada con formación de flóculos.....	103

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 AGENTES QUÍMICOS USADOS EN LOS PROCESOS DE DESCRUDE Y BLANQUEO DE LA FIBRA	5
Tabla 2 Valores Máximos Admisibles De Parámetros En Cuerpos Receptores.....	14
Tabla 3 Valores Máximos de descarga de Efluentes Industriales.....	14
Tabla 4 Valores de la constante de Henry para el CO ₂ disuelto en H ₂ O a distintas temperaturas	16
Tabla 5 Identificación de Muestras de Agua residual del descrude y blanqueo de diversas líneas de producción.....	39
Tabla 6 Informe de Análisis del Agua Residual	40
Tabla 7 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 35.2°C.....	42
Tabla 8 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 28.7°C.....	42
Tabla 9 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 28.2°C.....	43
Tabla 10 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 25.5°C.....	43
Tabla 11 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 25.6°C.....	44
Tabla 12 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 23°C.....	44
Tabla 13 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 20.1°C.....	45
Tabla 14 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 23.5°C.....	46
Tabla 15 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 22°C.....	46
Tabla 16 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 21.2°C.....	47
Tabla 17 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 20.7°C.....	47
Tabla 18 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 20.5°C.....	48
Tabla 19 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 20.5°C.....	48
Tabla 20 Demanda de CO ₂ para neutralizar agua residual a 20.2°C.....	48

Tabla 21 Dimensiones de los elementos del equipo propuesto en base a las dimensiones del tanque.....	58
Tabla 22 DIMENSIONES DEL EQUIPO IMPLEMENTADO	61
Tabla 23 Datos considerados en los cálculos.....	63
Tabla 24 Concentraciones teóricas de CO ₂ en el H ₂ O.....	64
Tabla 25 Concentraciones teóricas de CO ₂ para las pruebas realizadas en la primera fase	65
Tabla 26 Concentraciones teóricas de CO ₂ para las pruebas realizadas en la segunda fase.....	65
Tabla 27 Primera Fase de Masas teóricas de CO ₂ que pueden disolverse en 150 l de H ₂ O	66
Tabla 28 Segunda Fase de Masas teóricas de CO ₂ que pueden disolverse en 150 l de H ₂ O	66
Tabla 29 Eficiencias de Absorción de CO ₂ , primera fase de pruebas.....	67
Tabla 30 Eficiencias de Absorción de CO ₂ , segunda fase de pruebas.....	67
Tabla 31 Datos para el análisis de Varianza con dos factores y una sola muestra por grupo.....	68
Tabla 32 Análisis de Varianza	69
Tabla 33 Eficiencias de Absorción de CO ₂ , primera fase de pruebas.....	71
Tabla 34 Eficiencias de Absorción de CO ₂ , segunda fase de pruebas.....	72
Tabla 35 Valor promedio de uso de CO ₂ para la neutralización de 150 litros de agua residual..	72
Tabla 36 Adición de Coagulante para pH 7.12.....	77
Tabla 37 Adición de Coagulante para pH 6.87.....	77
Tabla 38 Adición de Coagulante para pH 6.74.....	77
Tabla 39 Adición de Coagulante para pH 6.72.....	78
Tabla 40 Adición de Coagulante para pH 6.69.....	78
Tabla 41 Análisis de Sólidos Suspendidos Totales del agua neutralizada y tratada.....	79
Tabla 42 Volúmenes de Alimentación a la PTAR.....	79

Tabla 43 Volumen de coagulante empleado después del proceso de Neutralización respecto a 100 ml de agua residual	80
Tabla 44 Agua residual generada en (m ³).....	80
Tabla 45 Volumen de Coagulante requerido antes y después del proceso de neutralización.....	81
Tabla 46 Promedio de masa de CO ₂ y coagulante demandados aplicando el proceso de Neutralización por lapsos de tiempo.....	82
Tabla 47 Costos de los Insumos para el proceso de Neutralización	83
Tabla 48 Costo del proceso de clarificación empleado actualmente en INDUSTRIAS ALBUS S.A.	83
Tabla 49 Costos Fijos.....	84
Tabla 50 Costos Variables	85
Tabla 51 Precio de Insumos	87
Tabla 52 Precio de mano de obra.....	88
Tabla 53 Precio de las herramientas y equipos	88

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO DE ALGODÓN HIDROFILO	6
Figura 2 Estados Físicos del CO ₂	17
Figura 3 Solubilidad del dióxido de carbono en función de la temperatura	19
Figura 4 Especies de CO ₂ (l) en función del pH.....	22
Figura 5 Comportamiento de la Curva de Neutralización del CO ₂	23
Figura 6 Impulsores más comunes empleados para agitación	26
Figura 7 Impulsor de tipo Hélice	28
Figura 8 Impulsor de tipo paleta	29
Figura 9 Impulsor de tipo Turbina Semiabierta.....	30
Figura 10 Tanque de Agitación con dimensiones típicas	33
Figura 11 Esquema de acción del coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales	35
Figura 12 Esquema de un equipo de flotación.....	36
Figura 13 Diagrama de Proceso para la Recolección de Muestras.....	38
Figura 14 Diagrama de procesos para la neutralización de agua residual con CO ₂	41
Figura 15 Tanque Base para la Propuesta.....	55
Figura 16 Vista Isométrica del sistema de agitación	57
Figura 17 Esquema con Dimensiones.....	59
Figura 19 Tanque de Neutralización en proceso de dosificación y agitación	62
Figura 20 Vista del tanque, burbujeador y agitador.....	62
Figura 21 Diagrama de Procesos detallando la metodología de clarificación.....	76

INDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Demanda de CO ₂ para el proceso de Neutralización a diferentes Temperaturas, 1° fase de pruebas	45
Gráfica 2 Demanda de CO ₂ para el proceso de Neutralización a diferentes Temperaturas, 2° fase de pruebas	49
Gráfica 3 Concentraciones teóricas de CO ₂ en el H ₂ O respecto a la Temperatura.....	64
Gráfica 4 Comparación de Tukey: Diferencias de las medias para pH según la temperatura.....	70

INDICE DE SIMBOLOS

CO₂ Dióxido de carbono.

pH: Medida del grado de acidez o alcalinidad de una sustancia o una solución. El pH se mide en una escala de 0 a 14.

H₂CO₃: Ácido carbónico.

CO₃⁼ Ión carbonato.

K₁, K₂: Constantes de disociación.

HCO₃⁻: Ión carbonato ácido.

DQO: Demanda química de oxígeno.

DBO: Demanda biológica de oxígeno.

DBO₅: La cantidad de oxígeno disuelto consumido en cinco días por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica.

SST: Sólidos en suspensión totales.

P: Presión.

k_H: Constante de Henry.

C: Concentración.

°C: Grado centígrado.

m: Metro.

l: Litro.

DAF: Equipos de separación de partículas sólidas, grasas y aceites, diseñados para clarificar aguas residuales.

Bs: Moneda boliviano.

g: Gramo.

mg: Miligramo.

m³: Metro cúbico.

D: Diámetro externo

d: Diámetro interno.

H: Altura.

GLOSARIO DE TERMINOS

NEUTRALIZACION: La reacción entre un ácido y una base.

AGUAS RESIDUALES: Son aguas con impurezas procedentes de vertidos de diferentes orígenes, domésticos e industriales, principalmente.

CORROSION: Consiste en el proceso de deterioro de materiales metálicos mediante reacciones químicas y electroquímicas, debido a que estos materiales buscan alcanzar un estado de menor potencial energético.

GAS: Es un estado de agregación de la materia en el cual, bajo ciertas condiciones de temperatura y presión, sus moléculas interactúan débilmente entre sí, sin formar enlaces moleculares.

LIQUIDO: Es uno de los tres estados de agregación de la materia. Un líquido es un fluido (además de los gases) cuyo volumen es constante bajo condiciones de temperatura y presión constantes.

TANQUES DE BURBUJEO: Es un aparato con el cual una corriente de gas, en forma de pequeñas burbujas, es introducida en un líquido.

TORRES DE PLATOS: Son cilindros verticales en que el líquido y el gas se ponen en contacto en forma de platos sobre platos o charolas, donde el líquido entra en la parte superior y fluye en forma descendente por gravedad, este fluye a través de cada plato y a través de un conducto

ABSORCION: Es la operación unitaria que consiste en la separación de uno o más componentes de una mezcla gaseosa con la ayuda de un solvente líquido el cual forma solución.

ALCALINIDAD: Es una medida de la capacidad del agua para neutralizar los ácidos.

HIDROFILO: Que absorbe agua con facilidad.

COAGULANTE: Sales metálicas que reaccionan con la alcalinidad del agua, para producir un floculo de hidróxido del metal, insoluble en agua, que incorpore a las partículas coloidales.

FLOCULACION: Es un proceso químico mediante el cual, con la adición de sustancias denominadas floculantes, se aglutinan las sustancias coloidales presentes en el agua, facilitando de esta forma su decantación y posterior filtrado.

AUTORIDAD AMBIENTAL COMPETENTE: Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, MDSMA, a nivel nacional, y la Prefectura a nivel departamental.

CONTAMINACION DE AGUAS: Alteración de las propiedades físico-químicas y/o biológicas del agua por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos o mínimos permisibles, según corresponda, de modo que produzcan daños a la salud del hombre deteriorando su bienestar o su medio ambiente.

CUERPO DE AGUA: Arroyos, ríos, lagos y acuíferos, que conforman el sistema hidrográfico de una zona geográfica.

EFLUENTE CONTAMINADO: Toda descarga líquida que contenga cualquier forma de materia inorgánica y/u orgánica o energía, que no cumpla los límites establecidos en el presente reglamento.

LIMITE PERMISIBLE: Concentración máxima o mínima permitida, según corresponda, de un elemento, compuesto o microorganismo en el agua, para preservar la salud y el bienestar humano y el equilibrio ecológico, en concordancia con las clases establecidas.

1. CAPITULO 1.

1.1. Introducción

La normativa ambiental vigente en nuestro país, solicita a las industrias realizar el tratamiento de sus aguas residuales, las mismas, deben realizar ajustes en sus procedimientos ambientales como, por ejemplo, mantener un pH dentro de los límites permisibles estipulados, regular el DBO, DQO, entre otros para proceder con su descarga.

A medida que la industria se desarrolla, se descarga una gran cantidad de aguas residuales alcalinas o ácidas de varios procesos industriales. Las aguas residuales alcalinas generadas a partir de diversos procesos, se neutralizan principalmente con ácidos fuertes como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico, pero siempre existe el riesgo de corrosión y manipulación del equipo cuando se utilizan ácidos fuertes.

En otros casos, para la neutralización de aguas residuales alcalinas, se añade mayor volumen de coagulante en su tratamiento, debido a que este, aparte de realizar la función de formar coágulos con los sólidos presentes también disminuye su pH; en consecuencia, se tiene un mayor consumo de coagulante en el proceso, representando de esta manera un mayor costo.

Los coagulantes más usados industrialmente corresponden a sales de carácter ácido, como ser el sulfato de aluminio, sulfato férrico o mezclas de estas sales con determinados polímeros, dependiendo la naturaleza del agua que se va a tratar.

Estos coagulantes (sales ácidas), al presentar un carácter ácido, conforme se adicionan van disminuyendo el pH del agua residual.

Como solución a esto, se utiliza el CO_2 como agente neutralizante de aguas residuales alcalinas; en el caso de neutralizar aguas residuales alcalinas usando CO_2 , a diferencia de cuando se usa un ácido fuerte, existe una zona tampón en la reacción de neutralización, por lo que es fácil mantener el pH entre 6 y 7 incluso si la cantidad de CO_2 se introduce ligeramente en exceso.

Por otro lado, los dispositivos usados pueden clasificarse según que su acción principal sea dispersar el gas o el líquido, aun cuando en muchos aparatos ambas fases se dispersan (Treybal, 1997, pág. 157).

En cuanto a la dispersión del gas en el líquido se incluyen aparatos como tanques de burbujeo, aparatos agitados mecánicamente y los distintos tipos de torres de platos. Respecto a la dispersión del líquido tenemos a las torres de paredes mojadas y las torres empacadas.

Sin embargo, los aparatos de absorción de gas que son utilizados industrialmente por lo general incluyen la columna de burbujas, el recipiente agitado y la torre empaquetada.

En comparación con las características de baja tasa de transferencia de material, el recipiente agitado tiene una alta tasa de transferencia de material debido a la alta intensidad de turbulencia provocada por la agitación del impulsor. Se requiere el costo de energía adicional requerido, y la torre empaquetada aumenta el área de contacto gas-líquido, mientras que una caída de presión alta tiene problemas de aplicabilidad.

Una vez eliminada la alcalinidad del agua residual se procede al tratamiento primario, secundario y/o terciario según las características que esta requiera, para cumplir con los límites permisibles de descarga estipulados en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333 del Medio Ambiente.

1.2. Antecedentes

A través del tiempo se ha ido incrementando la importancia de la conservación de los recursos naturales, especialmente el agua; actualmente se están desarrollando y buscando métodos para cuidarla y recuperarla de los diversos procesos industriales que se efectúan.

Las aguas residuales son las provenientes de procesos industriales, explicado de otra manera, son las que han sido empleadas en diversos sistemas de fabricación, producción o manejo industrial y que para ser desechadas necesitan ser tratadas previamente, de manera tal que puedan ser adecuadas para su ubicación en las respectivas redes de vertido, depuradoras o sistemas naturales, tales como lagos, ríos, embalses, etc.

Las impurezas se encuentran en el agua como materia en suspensión, como material coloidal, o como materia en solución; mientras que la materia en suspensión siempre se separa por medio mecánico, con intervención o no de la gravedad, la materia coloidal requiere un tratamiento fisicoquímico preliminar y la materia en solución puede tratarse en el propio estado molecular o iónico o precipitarse y separarse utilizando procesos semejantes a los empleados para la separación de los sólidos inicialmente en suspensión. A esto es lo que se denomina tratamiento de las aguas. (Da Camara, Hernández, & Paz, 2018, pág. 4)

El método más común de neutralización de residuos alcalinos es realizado mediante la adición de ácidos minerales, que incluyen: adicionar cantidades apropiadas de ácidos fuertes o débiles al residuo, agregar CO₂ comprimido al residuo o mezclar el residuo ácido con un residuo básico compatible. (Pinto, 2009, pág. 3)

El uso del CO₂ para la neutralización de efluentes alcalinos consiste esencialmente en hacer reaccionar agua con características alcalinas con el ácido carbónico generado por la solubilización del CO₂ en agua. (de Freitas, 2002, pág. 4)

El uso del CO₂ tiene una gran cantidad de ventajas frente a los ácidos minerales; en primera instancia, no se producen nuevos compuestos en el agua, como sulfatos o cloruros, se evita la corrosión derivada del uso de ácidos minerales y su manipulación es mucho más segura y cómoda.

1.3. Planteamiento del problema

INDUSTRIAS ALBUS S.A. se encuentra ubicada en la zona Pura Pura de la ciudad de La Paz, se ocupa de la elaboración de insumos de uso médico de origen textil. Para ello, compra algodón crudo e hilos de producción nacional, traídos desde el departamento de Santa Cruz.

INDUSTRIAS ALBUS S.A. trabaja con dos líneas de fabricación, una dedicada a la producción de algodón hidrófilo y la otra, a la producción de gasas, compresas y vendas, todos estos insumos médicos (Industrias Albus S.A., 2019, pág. 8).

En su producción, durante el blanqueo y descrude específicamente, utiliza agua y agentes químicos que ayudan en la eliminación de todas las impurezas del algodón cosechado y los hilos crudos, en dicho proceso se usan los siguientes agentes químicos responsables de la alcalinidad de sus aguas residuales, detallados en la **Tabla 1**.

El hidróxido de sodio y el carbonato de sodio son los principales compuestos responsables de la alcalinidad del agua resultante del proceso de blanqueo y descrude.

Tabla 1*AGENTES QUÍMICOS USADOS EN LOS PROCESOS DE DESCRUDE Y BLANQUEO DE LA FIBRA*

AGENTE QUIMICO	FUNCION
Hidróxido de sodio	Lavado y blanqueo de las fibras
Carbonato de sodio	Lavado y blanqueo de fibras además de regular su pH
Peróxido de hidrógeno	Oxida pigmentos de las fibras blanqueándolas
Detergente industrial	Remueve aceites y dispersa impurezas de las fibras
Secuestrante	Elimina minerales presentes en la fibra
Humectante	Absorbe y retiene la humedad en la fibra
Blanqueador óptico	Mejora la percepción de blancura
Acido fórmico	Neutraliza el hidróxido de sodio

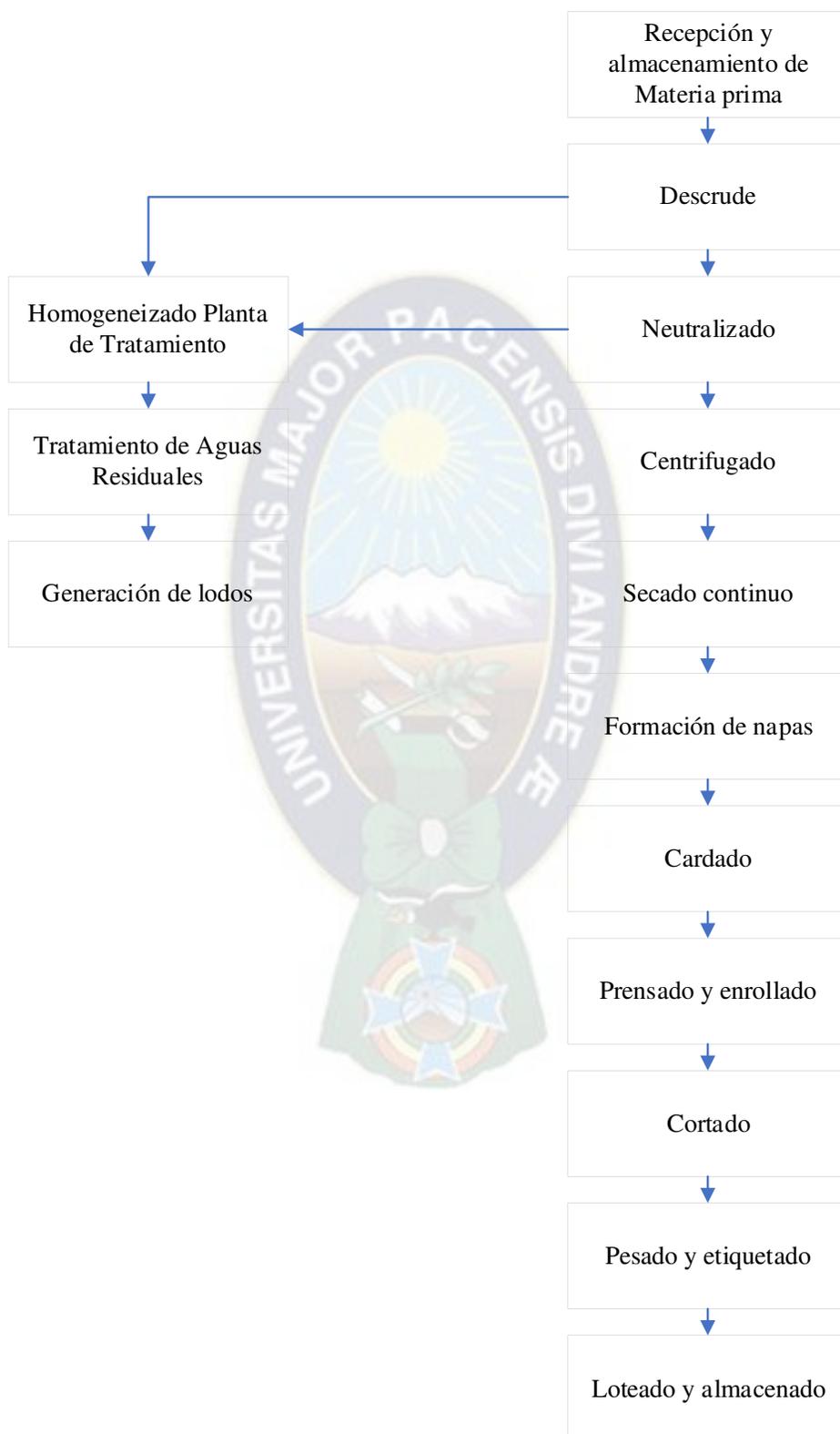
Nota. Proceso Productivo de Industrias ALBUS, detallado en el documento oficial de la empresa.

Más del 50% del consumo industrial de agua corresponde a los procesos de Descrude, Blanqueo de la Fibra, Neutralizado y Acabado de la fibra, los efluentes líquidos generados de estos procesos pasan a un tanque de almacenamiento donde se homogeneizan, posteriormente pasan por una etapa de enfriamiento y se acondicionan a temperaturas adecuadas para el proceso de clarificación, para el ingreso a la planta de tratamiento de aguas residuales.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo que representa el proceso productivo y muestra los puntos donde se generan aguas residuales que, forman como desecho aguas residuales de carácter alcalino.

Figura 1

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO DE ALGODÓN HIDROFILO



Como resultado de estos procesos industriales, el pH del agua residual será de carácter básico oscilando entre 10.5 y 12.10 (ANEXOS 1 Y 2), influyendo en este valor las características de la materia prima entre otros, estando por encima del límite permisible de descarga que se encuentra entre 6 y 9, detallado en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (Reglamento de la Ley de Medio Ambiente, Anexo-2, pág. 108).

Por lo tanto, se plantea la adición de CO₂ para eliminar su alcalinidad y reducir la cantidad de coagulante usado en el tratamiento primario de estas aguas residuales, para tal cometido se adquirirá este gas puro y se realizará un estudio para evaluar la dispersión de este en el agua residual.

Al adicionar CO₂ se contempla la formación de carbonatos y bicarbonatos que elevarán la dureza del agua residual, sin embargo, estos sólidos disueltos serán separados y eliminados en los procesos de coagulación y floculación.

Para calcular la cantidad de CO₂ usado en este proceso se realizará un pesado del botellón respecto a su pH para obtener una curva de neutralizado, considerando diferentes temperaturas de trabajo.

1.4. Justificación General

Con la implementación de CO₂ se pretende plantear una alternativa en el tratamiento de aguas residuales de Industrias ALBUS S.A. respecto a, la cantidad de coagulante usado en el proceso ya que, al tener aguas residuales con alcalinidad elevada, la función del coagulante además es de disminuir su pH, ocasionando de esta manera, un mayor consumo del mismo.

1.4.1. Justificación Académica

Implementar conocimientos adquiridos relacionados al tratamiento de aguas residuales.

1.4.2. Justificación Social

Plantear una alternativa al tratamiento de aguas residuales alcalinas con el uso de gas CO₂ para el caso de Industrias ALBUS S.A., sabiendo que este gas no presenta riesgos de manipulación en los operarios comparado al uso de ácidos fuertes.

1.4.3. Justificación Ambiental

Utilizar el CO₂ como alternativa amigable con el medio ambiente respecto a la utilización de ácidos fuertes en la neutralización de aguas residuales alcalinas.

1.4.4. Justificación Técnica

Proponer una alternativa de neutralización de aguas residuales alcalinas con gas CO₂, el cual no presenta riesgos en su manipulación y cuenta con una zona tampón que no permite cambios bruscos en su pH.

1.4.5. Justificación Económica

Proponer una alternativa a la reducción del pH en aguas residuales alcalinas en INDUSTRIAS ALBUS S.A. con la implementación de CO₂, buscando reducir costos respecto a la cantidad del coagulante utilizado actualmente.

1.5. Objetivo General

Evaluar la capacidad de dispersión del CO₂ con un tanque de agitación, para eliminar la alcalinidad de aguas residuales provenientes de los procesos de descrude y blanqueo, reduciendo la cantidad de coagulante empleado en el proceso de coagulación.

1.6. Objetivos Específicos:

- Caracterizar las aguas residuales.

- Comprobar la disminución del pH en las aguas residuales alcalinas con adición de CO₂.
- Proponer un equipo adecuado para la mayor dispersión de CO₂ en el agua residual.
- Armar equipo propuesto
- Establecer condiciones de operación óptimas para el proceso.
- Determinar la cantidad de CO₂ adecuado por m³ de agua residual alcalina para su neutralización.
- Determinar la cantidad de coagulante usado antes y después del proceso de neutralizado con CO₂.
- Efectuar un análisis de costos a este proceso.



CAPITULO 2.

2. Marco teórico

2.1. Conceptualización de términos usados en tratamiento de aguas residuales

2.1.1. Aguas Residuales Crudas

Aguas procedentes de usos domésticos, comerciales, agropecuarios y de procesos industriales, o una combinación de ellas, sin tratamiento posterior a su uso. (Reglamento de la Ley de Medio Ambiente, Anexo-2, pág. 84)

2.1.2. Aguas Residuales Tratadas

Aguas procesadas en plantas de tratamiento para satisfacer los requisitos de calidad en relación a la clase de cuerpo receptor a que serán descargadas.

2.1.3. Agua Alcalina

Agua que contiene una cantidad de sustancias básicas que hacen al pH estar en rangos por encima de 7,0. Esta alcalinidad está dada por los procesos de descrude y blanqueo del algodón, gasas y vendas elaboradas en Industrias ALBUS S.A.

2.1.4. Potencial hidrógeno (pH)

Valor que determina si una sustancia es ácida, neutra o básica, calculado por el número de iones de hidrógeno presente. Es medido en una escala desde 0 a 14, en la cual 7 significa que la sustancia es neutra.

Valores de pH por debajo de 7 indica que la sustancia es ácida y valores por encima de 7 indican que la sustancia es básica. (Doménech & Peral , 2006, pág. 2)

$$pH = -\log[H^+]$$

2.1.5. Demanda química de oxígeno (DQO)

Cantidad de oxígeno medido en mg/l, que es consumido en la oxidación de materia orgánica y materia inorgánica oxidable, bajo condiciones de prueba. Es usado para medir la cantidad total de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales. (Doménech & Peral , 2006, p. 2)

2.1.6. Contaminación de Aguas

Alteración de las propiedades físico-químicas y/o biológicas del agua por sustancias ajenas, por encima o debajo de los límites máximos o mínimos permisibles, según corresponda, de modo que produzcan daños a la salud del hombre deteriorando su bienestar o su medio ambiente. (Reglamento de la Ley de Medio Ambiente, Anexo-2, pág. 84)

2.1.7. Demanda biológica de oxígeno (DBO)

La cantidad de oxígeno (medido en el mg/l) que es requerido para la descomposición de la materia orgánica por los organismos unicelulares, bajo condiciones de prueba. Se utiliza para medir la cantidad de contaminación orgánica en aguas residuales. (Doménech & Peral , 2006, p. 2)

2.1.8. Demanda biológica de oxígeno (DBO₅)

La cantidad de oxígeno disuelto consumido en cinco días por las bacterias que realizan la degradación biológica de la materia orgánica. Se determina en laboratorio a una temperatura de 20°C. (Doménech & Peral , 2006, pág. 3)

2.1.9. Sólidos en suspensión totales

El promedio del Total de Sólidos en Suspensión (SST) en el recurso hídrico corresponde a la suma de los valores del Total de Sólidos en Suspensión (SST) por punto de muestreo dividido por el número de puntos de muestreo. (Doménech & Peral , 2006, pág. 3)

2.1.10. Efluente Industrial

Aguas residuales crudas o tratadas provenientes de procesos industriales.

2.1.11. Efluente Contaminado

Toda descarga líquida que contenga cualquier forma de materia inorgánica y/u orgánica o energía, que no cumpla los límites establecidos en el presente reglamento.

2.1.12. Limite Permisible

Concentración máxima o mínima permitida, según corresponda, de un elemento, compuesto o microorganismo en el agua, para preservar la salud y el bienestar humanos y el equilibrio ecológico, en concordancia con las clases establecidas.

2.2. Calidad de Agua

2.2.1. El Concepto de Calidad de Agua

La calidad del agua es una variable fundamental del medio hídrico, tanto en lo que respecta a la caracterización ambiental como desde la perspectiva de la planificación hidrológica, por lo tanto, se evaluarán distintos parámetros fisicoquímicos para determinar su calidad, su clase, si puede o no ser desechada a cuerpos de agua o alcantarillado.

De forma tradicional se ha entendido por calidad de un agua el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que hacen que el agua sea apropiada para un uso determinado. Esta definición ha dado lugar a diversa normativa, que asegura la calidad suficiente para garantizar determinados usos, pero que no recoge los efectos y consecuencias que la actividad humana tiene sobre las aguas naturales.

2.2.2. Clasificación de Cuerpos de Agua

Esta clasificación general de cuerpos de agua está en relación con su aptitud de uso:

2.2.2.1. 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.

2.2.2.2. CLASE “B”

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

2.2.2.3. CLASE “C”

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

2.2.2.4. CLASE “D”

Aguas de calidad mínima 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. (Reglamento de la Ley de Medio Ambiente, Anexo-2, pág. 87)

2.2.3. Parámetros permitidos de descargas líquidas en cuerpos de agua

El Reglamento En Materia de Contaminación Hídrica en el Anexo A-1 establece los límites máximos de parámetros permitidos del agua que se pueden descargar en efluentes receptores; se detalla en la **Tabla 2** según la clasificación de cuerpos de agua.

También, en el Anexo A-2 se establecen parámetros de descarga de aguas residuales industriales, algunos de estos son los mismos para cualquier rubro industrial.

Sin embargo, se detallan ciertos parámetros que tienen determinados valores para sectores específicos, en la Tabla 3 se detallan los más importantes para el sector industrial textil, siendo el pH, SST y la temperatura de descarga los más importantes en un tratamiento primario de aguas residuales.

Tabla 2

Valores Máximos Admisibles De Parámetros En Cuerpos Receptores

N°	Parámetros	Unidad	Clase "A"	Clase "B"	Clase "C"	Clase "D"
1	pH		6 - 8.5	6 - 9	6 - 9	6 - 9
2	Temperatura	°C	+/- 3°C de receptor			
3	Sólidos disueltos totales	mg/l	1000	1000	1500	1500
4	Aceites y grasas	mg/l	Ausentes	Ausentes	0.3	1
5	DBO ₅	mg/l	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/l	<5	<10	<40	<60

Nota. Datos obtenidos del ANEXO A-1 del Reglamento En Materia de Contaminación Hídrica.

Tabla 3

Valores Máximos de descarga de Efluentes Industriales

Parámetros	Unidad	Valor máximo aceptable
pH		6 - 9
Temperatura	°C	+/- 5°C de receptor
Sólidos suspendidos totales	mg/l	60
Aceites y grasas	mg/l	10
DBO ₅	mg/l	80
DQO	mg/l	250

Nota. Datos obtenidos del ANEXO A-2 del Reglamento En Materia de Contaminación Hídrica. Solubilidad de gases en agua

2.3. Ley de Henry

La Ley de Henry enuncia que, a una temperatura constante, la cantidad de gas disuelto en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido. Matemáticamente puede formularse como:

$$P = k_H * C$$

P: Presión parcial del gas

k_H : Constante de Henry

C: Concentración del gas

La concentración del gas se puede expresar en distintas unidades tales como molaridad, molalidad o fracción molar. Sin embargo, en la mayoría de los casos, los químicos utilizan la concentración en unidades de molaridad (mol/L), mientras que la presión la expresan en atmósferas.

Esto significa que cuanto mayor sea la presión del gas sobre un líquido, mayor será la cantidad total del gas que se podrá disolver en él. De esta manera, se obtendrá una mayor concentración del gas en el líquido, es decir, tendrá una mayor solubilidad.

2.3.1.1. Excepciones de la Ley de Henry

La Ley de Henry es una ley ideal, que solo describe el comportamiento de las soluciones de gases reales bajo ciertas condiciones. Así, solo se puede aplicar la Ley de Henry cuando:

- La temperatura permanece constante.
- El gas se encuentra en equilibrio con la solución.

- La presión del gas es relativamente baja.
- El gas no reacciona con el solvente

A pesar de esto, incluso en algunos casos en los que el gas sí reacciona con el solvente, esta ley se puede aplicar de manera aproximada. (Bolívar, 2021)

La solubilidad de un gas en un líquido aumenta al disminuir la temperatura, en la siguiente tabla se muestran los valores para la constante de Henry del CO₂ disuelto en agua para diferentes temperaturas.

Tabla 4

Valores de la constante de Henry para el CO₂ disuelto en H₂O a distintas temperaturas

	mmHg*$\text{molH}_2\text{O/molCO}_2$									
T (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40	60	
CO₂	5,53E+5	6,66E+5	7,92E+5	9,30E+5	1,08E+6	1,24E+6	1,41E+6	1,77E+6	2,59E+6	

Nota. Datos extraídos de Francis L. Smith, Allan H. Harvey. Avoid Common Pitfalls When Using Henry's Law.

2.4. El dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas inerte, incoloro, inodoro, no inflamable y más pesado que el aire. Se obtiene industrialmente, como un subproducto de combustión o gasificación, como por ejemplo en la fabricación de gasolinas o gasóleos de mayor calidad y menos contaminantes.

Es un gas bastante soluble en al agua que, al disolverse en ella, produce ácido carbónico (H₂CO₃).

2.4.1. Propiedades químicas

El dióxido de carbono no es inflamable y, en condiciones atmosféricas, químicamente estable e inerte. Las reacciones de combustión son inhibidas o completamente suprimidas por el CO₂.

El dióxido de carbono puede reaccionar vigorosamente con el amoniaco o aminas.

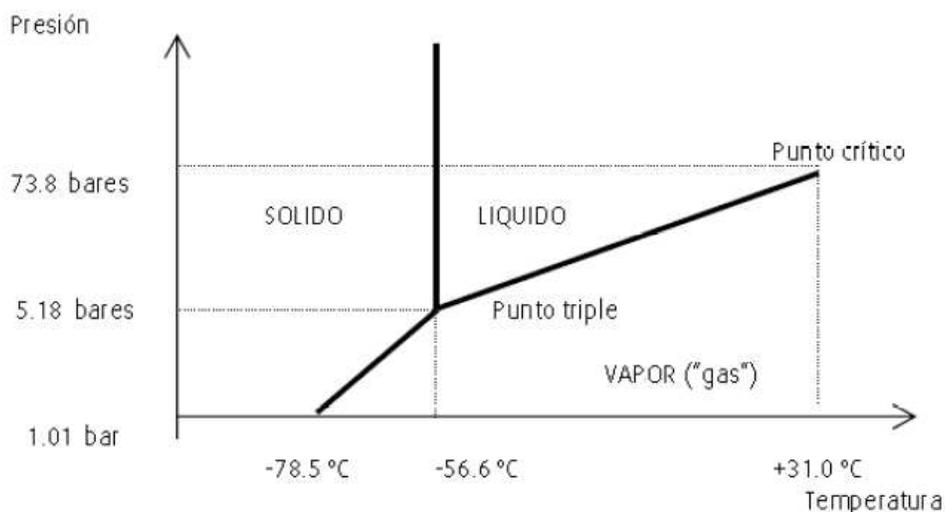
2.4.2. Propiedades físicas

El estado físico del dióxido de carbono depende de la presión y temperatura:

- A la presión atmosférica, el CO₂ es gaseoso.
- A temperaturas entre -56.6 y 31.1°C y presión de al menos 5.2 bar, el CO₂ puede existir en forma líquida. El CO₂ líquido no puede existir a presión atmosférica (1 bar).
- A temperaturas inferiores a -56.6°C, el CO₂ puede ocurrir en el estado sólido.
- Los tres estados físicos sólo son posibles en su punto triple de “-56.6°C y 5.2 bar”.

Figura 2

Estados Físicos del CO₂



Nota. Gráfica obtenida del Manual de Manejo de CO₂ de la empresa Abelló Linde S.A.

2.4.3. Cambios en sus Estados Físicos

El CO₂ contenido en un cilindro de gas se encuentra en estado líquido, es decir, bajo la presión de gas licuado. La presión en un cilindro de gas es de aproximadamente 57 bar a 20°C.

Por lo tanto, cuando el CO₂ sale del cilindro a través de una válvula a menos de 5.2 bar se produce CO₂ gaseoso; 1 kg de este gas líquido se expande a 550 l de gas a presión atmosférica.

2.4.4. Efectos Fisiológicos

El dióxido de carbono como gas es incoloro y prácticamente inodoro e insípido. Por tanto, es prácticamente imposible de detectar con los sentidos humanos.

El dióxido de carbono es considerado no tóxico. No es una sustancia peligrosa según se define en la Directiva de Sustancias y Preparados Peligrosos. El aire contiene aproximadamente 0,03 vol.% de dióxido de carbono. A altas concentraciones, el CO₂ puede ser perjudicial. Cuando el aire que respiramos contiene entre 3 - 5% v/v de CO₂, se produce dolor de cabeza, trastornos respiratorios y malestar. Del 8 - 10% v/v, calambres, inconsciencia, paro respiratorio y puede ocasionar la muerte. La concentración máxima de trabajo es de 0,5% vol. de CO₂.

2.4.5. Cilindros de CO₂

De acuerdo con el código de recipientes a presión, un cilindro puede contener un máximo de 0,75 kg de CO₂ por litro de volumen del cilindro. Este factor de relleno garantiza que la presión en el cilindro de CO₂ no se llega a la de prueba de presión de 250 bar por debajo de una temperatura de 65°C. Si el factor de llenado se excede, la presión dentro del cilindro aumenta considerablemente, incluso con un ligero aumento de la temperatura.

2.4.5.1. Presión en un cilindro de CO₂

La presión en un cilindro de CO₂ depende exclusivamente de la temperatura. A 20°C es de 57 bar. Incluso un cilindro de CO₂ casi vacío se mantiene en 57 bares a 20°C, siempre y cuando contenga la fase líquida. Esto significa que el contenido de un cilindro de CO₂ no se puede determinar mediante la medición de su presión, sólo por su peso.

Cuando la válvula del cilindro está abierta, la presión en el cilindro disminuye. El CO₂ continuamente se evapora de la fase líquida y emerge como un gas. (The Linde Group, pág. 3)

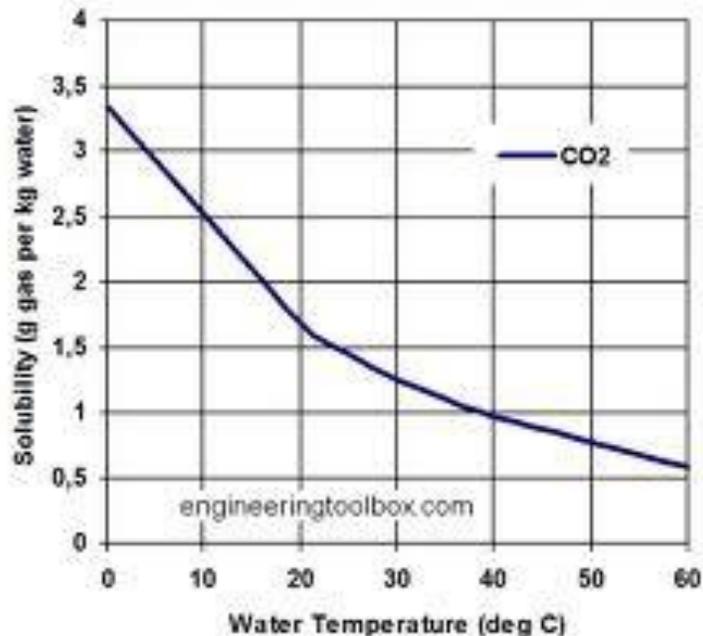
2.4.6. Solubilidad del dióxido de carbono en agua

La solubilidad del CO_2 es bastante superior al resto de los gases, esto debido a que este gas reacciona con el agua dando los correspondientes ácidos.

La solubilidad del CO_2 en el agua pura a 25°C y 1 atmósfera de presión es de 1.45 g/l y su variación con la temperatura queda reflejada en la siguiente gráfica, donde queda reflejada la gran solubilidad del mismo en el agua fría.

Figura 3

Solubilidad del dióxido de carbono en función de la temperatura



Nota. Gráfica extraída de Handbook of Chemistry and Physics, la cual nos muestra el comportamiento de la solubilidad del CO_2 con la temperatura.

2.4.7. El dióxido de carbono en el agua

Este CO_2 que penetra en el agua genera, inicialmente, ácido carbónico (H_2CO_3) el cual rápidamente entra a formar parte del complejo equilibrio ácido-base en el que participan las diferentes formas carbonatadas presentes en un agua.

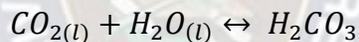
Así pues, la química de los procesos acido-base de un agua natural está dominada por la presencia del ion carbonato, $\text{CO}_3^{=}$, que es una base moderadamente fuerte, así como del ácido débil H_2CO_3 , y de sus interrelaciones. Aunque en un agua la mayor parte del CO_2 disuelto esta como CO_2 rodeado de moléculas de agua, parte estará en la forma de ácido carbónico, de tal forma que cuando se habla en general de ácido carbónico se asume también la parte del gas disuelta (CO_2 (aq)), a pesar de que es esta ultima la forma mayoritaria en la que se encuentra.

2.4.7.1. Reacciones de equilibrio

Cuando el CO_2 se disuelve en el agua pasando a formar H_2CO_3 , las dos primeras reacciones de equilibrio que se producen son:



(reacción regulada por la Ley de Henry para la solubilidad de gases en líquidos).



2.4.7.2. Reacciones de disociación

Una vez formado, el ácido carbónico se disocia parcialmente para dar bicarbonato y protones:



Para la doble disociación que podemos establecer para el ácido carbónico (ya que posee dos protones), tenemos entonces dos constantes de disociación sucesivas.

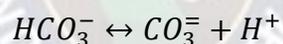
Los valores de las constantes de disociación suelen estar perfectamente determinados numéricamente para los procesos más comunes, por lo que estos se encuentran tabulados. En el caso del ácido carbónico se tiene



Según estos valores, en lo que respecta a la primera disociación, si $pK_{a1} = 6,35$ significa que $pK_{b2} = 7,65$, dicho de otro modo, el ácido carbónico es algo más fuerte (unas 20 veces) como ácido que el bicarbonato como base (el bicarbonato es la base conjugada del ácido carbónico), por lo que cuando el CO_2 se disuelve en agua tiende a acidificarla y a aumentar la concentración de bicarbonato. Por otro lado, en lo que respecta a la segunda disociación, si $pK_{a2} = 10,33$ significa que $pK_{b1} = 3,67$, dicho de otro modo, el carbonato es una base mucho más fuerte (cuatro millones y medio de veces) que el bicarbonato como ácido (este es ahora el ácido conjugado del carbonato), por lo que la segunda disociación apenas tiene lugar; al contrario, es el carbonato presente el que captaría rápidamente un protón aumentando la concentración de bicarbonato. Esto nos lleva a establecer que, la forma carbonatada más importante presente en el agua será el bicarbonato.



Equilibrio ligeramente desplazado a la derecha.



Equilibrio muy desplazado a la izquierda.

Si nos referimos a una pareja acido-base conjugados, K_b se refiere al proceso por el cual la base conjugada puede dar OH^- al medio. (Manahan, 2007, págs. 205-240)

2.4.7.3. Especies del dióxido de carbono líquido en función del pH

En función a las ecuaciones anteriores, se pueden expresar las concentraciones moleculares de cada una de las especies en función del pH.

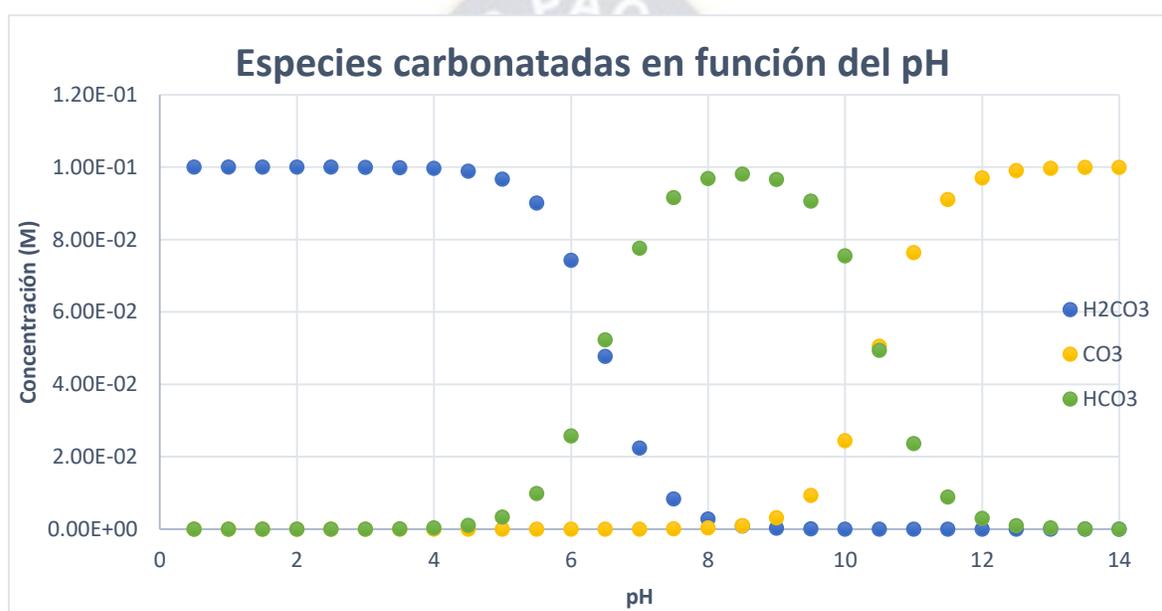
Dando valor 100 a la suma de las 3 especies, se tiene la Figura 4, que relaciona la proporción de cada una de ellas en función del pH.

Una rápida observación indica que, por ejemplo, a partir de 10,3 la especie predominante son los carbonatos, pero por debajo de 8,3 todos los carbonatos se han convertido a bicarbonatos.

Conforme el pH va descendiendo, disminuyen también los bicarbonatos y aumenta el CO_2 disuelto. Ese dato será fundamental a la hora de entender las necesidades de aporte de CO_2 para

Figura 4

Especies de CO_2 (l) en función del pH



Nota. *Elaboración propia, muestra las concentraciones de las especies carbonatadas respecto al pH para una concentración total*

Se ha visto, por lo tanto, que el CO_2 en agua forma ácido carbónico, que actúa como ácido débil y, por tanto, con capacidad de generar iones (H^+), como todos los ácidos. Además, y más importante, actúa reaccionando con las diferentes especies de carbono modificando su composición y porcentaje total.

Ambas acciones suponen, como consecuencia, una reducción del pH del agua. (Manahan, 2007, pág. 233)

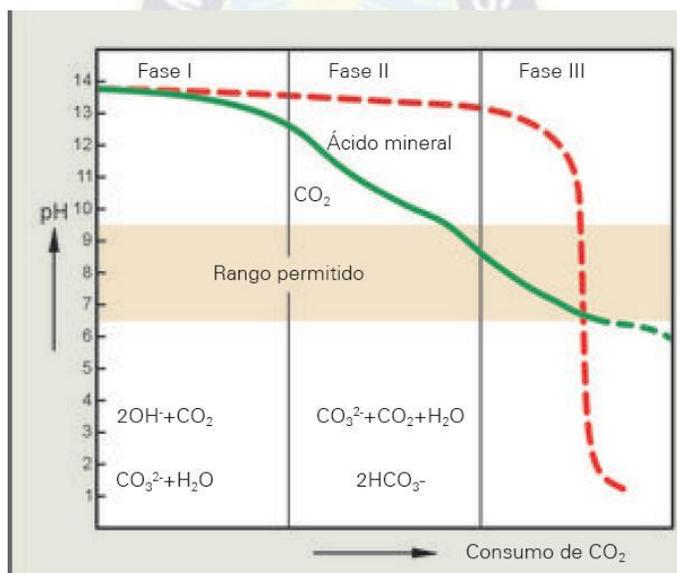
2.4.7.4. Comportamiento de la curva de Neutralización con CO_2

Un ácido mineral comparado con el ácido carbónico presenta una curva de neutralización que muestra, que en el momento que se añade a la solución a neutralizar, incluso en un rango cercano al punto neutro solo se tiene un efecto ligero en el valor del pH, excluyendo la sobre acidificación.

En cambio, se observa la curva de neutralización con CO_2 , la cual presenta una variación casi lineal de su valor de pH respecto al consumo de CO_2 , llegando hasta un valor mínimo de 6 el cual representa su punto tampón.

Figura 5

Comportamiento de la Curva de Neutralización *del* CO_2



Nota. Gráfica representativa del comportamiento de la curva de neutralización con CO_2

2.4.7.5. Efecto Tampón del CO_2 en el agua residual

Una solución tampón es la formada por unos compuestos en equilibrio químico de tal forma que ante pequeñas adiciones de ácidos o bases no sufre variaciones en la concentración de H^+ u OH^- , en el caso del CO_2 , este valor se aproxima a 6 en el cual, aunque se sobreacidifique la solución, no disminuirá apreciablemente su valor de pH.

2.5. Operaciones Gas-Líquido

2.5.1. Equipos para operaciones Gas-Líquido

El propósito del equipo es permitir el contacto íntimo de los dos fluidos, con el fin de que se lleve a cabo la difusión interfacial de los componentes. La rapidez de la transferencia de masa depende directamente de la superficie interfacial expuesta entre las fases; por lo tanto, la naturaleza y grado de dispersión de un fluido en el otro son de la mayor importancia.

De modo general, el equipo puede clasificarse según que su acción principal sea dispersar el gas en el líquido o el líquido en el gas, aun cuando en muchos aparatos las dos fases se dispersan. (Treybal, 1997, pág. 157)

2.5.1.1. Dispersión del Gas

Se evidencian aparatos como tanques agitados mecánicamente y de burbujeo, también las torres de platos. Cuando no se requieren efectos de contracorriente, cuando el gas está disperso como burbujas, el gas y el líquido se tratan en tanques agitados; este caso es conveniente cuando se necesita una reacción química entre el gas disuelto y un componente del líquido; generalmente existen sólidos suspendidos en los líquidos, por lo tanto, los tanques agitados mecánicamente serán los más empleados para este propósito.

2.5.2. Agitación Mecánica, Contacto Gas-Líquido

Generalmente el equipo consiste en un recipiente cilíndrico (cerrado o abierto), y un agitador mecánico, montado en un eje y accionado por un motor eléctrico. Las proporciones del tanque varían ampliamente, dependiendo de la naturaleza del problema de agitación. El fondo del tanque debe ser redondeado, con el fin de eliminar los bordes rectos o regiones en las cuales no penetrarían las corrientes del fluido.

La altura del líquido, es aproximadamente igual al diámetro del tanque. Sobre un eje suspendido desde la parte superior, va montado un agitador. El eje está accionado por un motor, conectado a veces, directamente al mismo, pero con mayor frecuencia, a través de una caja de engranajes reductores.

Un tanque con una profundidad del líquido de aproximadamente el diámetro del tanque, debe estar provisto de un borde libre adecuado para la retención del gas durante el flujo del gas. Es mejor introducir el gas por debajo del impulsor, a través de un burbujeador en forma de anillo con un diámetro igual o ligeramente más pequeño que el del impulsor, con los orificios en la parte superior.

Los orificios pueden tener entre 3 a 6.5 mm de diámetro, en un número tal que se tenga un número de Reynolds del orificio Re , del orden de 10 000 o más, aunque esto no es especialmente importante.

2.5.2.1. Agitadores para tanques cerrados y tanques abiertos de montaje fijo

Estos tipos de agitadores son recomendados para su aplicación, y todo depende de los requisitos de su proceso. Los hay de acoplados directo, estos están diseñados para aplicaciones de baja viscosidad, o volúmenes pequeños, o aplicaciones en que se requiere trituración del producto.

Estos agitadores varían desde 1/4 a 5 caballos de fuerza (HP), y son disponibles con siete diferentes velocidades, y con una variedad de hélices. Estos agitadores son disponibles ya sea con motor eléctrico, o motores de aire, así como también pueden ser equipados con variador de velocidades.

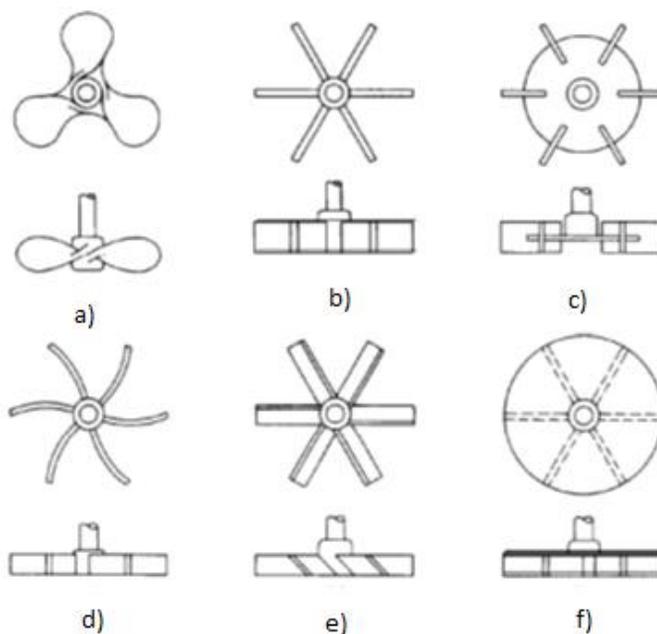
Agitadores de este tipo son equipados con ANSI cobertura, con selladores de empaquetaduras o mecánicos, para uso con tanques cerrados. También son disponibles con base cuadrada para ser montados en tanques abiertos donde selladores no son necesarios, esta montadura también las hay en ángulo para dar una mayor eficiencia a la aplicación. (McCabe & Smith, 1968)

2.5.2.2. Agitadores

Existen muchos diseños que, generalmente están montados sobre un eje movido por un motor y arreglado en forma axial. En particular, en los de menor tamaño, el impulsor y el eje pueden entrar en el tanque formando un ángulo con el eje del tanque, con la guía del motor unida al borde del tanque.

Figura 6

Impulsores más comunes empleados para agitación



Nota. Tipos de Impulsores usados para la agitación de líquidos de diferentes viscosidades. Imagen extraída de Treybal; 1997

En la **Figura 6**, el inciso a) muestra un propulsor de tipo marino, se opera a velocidad relativamente elevada, particularmente en líquidos con baja viscosidad y son útiles por su gran capacidad para permitir la circulación del líquido. Generalmente la relación entre el diámetro del impulsor y el diámetro del tanque es aproximadamente:

$$\frac{d_i}{d_T} = \frac{1}{5}$$

d_i = diámetro del impulsor

d_T = diámetro del tanque

Las turbinas, especialmente el diseño de hojas planas b) y c) de la figura, se utilizan a menudo para operaciones de transferencia de masa. El diseño de hoja curva, figura d), es útil para la suspensión de pulpas frágiles, cristales y similares; la turbina de hoja sumergida, figura e) es útil para mezclar líquidos. El impulsor cubierto de la figura f) se usa poco en el contacto de gas-líquido.

2.5.2.2.1. Agitadores de Hélice

Un agitador de hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos pocos viscosos. Los agitadores de hélice más pequeños, giran a toda la velocidad del motor, unas 1.150 o 1.750 rpm; los mayores giran de 400 a 800 rpm. Las corrientes de flujo, que parten del agitador, se mueven a través del líquido en una dirección determinada hasta que son desviadas por el fondo o las paredes del tanque. La columna de remolinos de líquido de elevada turbulencia, que parte del agitador, arrastra en su movimiento al líquido estancado, generando un efecto considerablemente mayor que el que se obtendría mediante una columna equivalente creada por una boquilla estacionaria.

Las palas de la hélice cortan o friccionan vigorosamente el líquido. Debido a la persistencia de las corrientes de flujo, los agitadores de hélice son eficaces para tanques de gran tamaño. (McCabe & Smith, 1968)

Figura 7

Impulsor de tipo Hélice



Nota. Figura referencial obtenida de Direct Industry

2.5.2.2.2. Agitadores de Paletas

Para problemas sencillos, un agitador eficaz está formado por una paleta plana, que gira sobre un eje vertical. Son corrientes los agitadores formados por dos y 3 paletas. Las paletas giran a velocidades bajas o moderadas en el centro del tanque, impulsando al líquido radial y tangencialmente, sin que exista movimiento vertical respecto del agitador, a menos que las paletas estén inclinadas. Las corrientes de líquido que se originan se dirigen hacia la pared del tanque y después siguen hacia arriba o hacia abajo. Las paletas también pueden adaptarse a la forma del fondo del tanque, de tal manera que en su movimiento rascan la superficie o pasan sobre ella con una holgura muy pequeña. Un agitador de este tipo se conoce como agitador de ancla. Estos agitadores son útiles cuando se desea evitar el depósito de sólidos sobre una superficie de transmisión de calor, como ocurre en un tanque enchaquetado, pero no son buenos mezcladores.

Generalmente trabajan conjuntamente con un agitador de paletas de otro tipo, que se mueve con velocidad elevada y que gira normalmente en sentido opuesto.

Figura 8

Impulsor de tipo paleta



Nota. Figura referencial obtenida de BIOGEN Científica

Los agitadores industriales de paletas giran a una velocidad comprendida entre 20 y 150 rpm. La longitud del rodete de un agitador de paletas es del orden de 50 al 80% del diámetro interior del tanque. La anchura de la paleta es de un sexto a un décimo de su longitud. A velocidades muy bajas, un agitador de paletas produce una agitación suave, en un tanque sin placas deflectoras o cortacorrientes, las cuales son necesarias para velocidades elevadas. De lo contrario el líquido se mueve como un remolino que gira alrededor del tanque, con velocidad elevada, pero con poco efecto de mezcla. (McCabe & Smith, 1968)

2.5.2.2.3. Agitadores de Turbina

La mayor parte de ellos se asemejan a agitadores de múltiples y cortas paletas, que giran con velocidades elevadas sobre un eje que va montado centralmente dentro del tanque. Las paletas pueden ser rectas o curvas, inclinadas o verticales.

El rodete puede ser abierto, semicerrado o cerrado. El diámetro del rodete es menor que en el caso de agitadores de paletas, siendo del orden del 30 al 50% del diámetro del tanque.

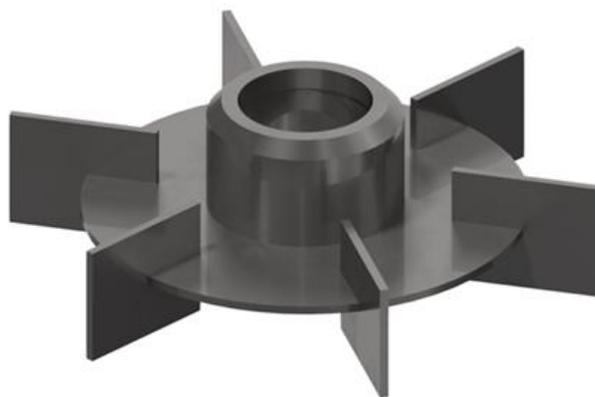
Los agitadores de turbina son eficaces para un amplio intervalo de viscosidades; en líquidos poco viscosos, producen corrientes intensas, que se extienden por todo el tanque y destruyen las masas de líquido estancado. En las proximidades del rodete existe una zona de corrientes rápidas, de alta turbulencia e intensos esfuerzos cortantes. Las corrientes principales son radiales y tangenciales. Las componentes tangenciales dan lugar a vórtices y torbellinos, que se deben evitar por medio de placas deflectoras o un anillo difusor, con el fin de que el rodete sea más eficaz.

El agitador de turbina semiabierta, conocido como agitador de disco con aletas, se emplea para dispersar o disolver un gas en un líquido.

El gas entra por la parte inferior del eje del rodete; las aletas lanzan las burbujas grandes y las rompen en muchas pequeñas, con lo cual se aumenta grandemente el área interfacial entre el gas y el líquido. (McCabe & Smith, 1968)

Figura 9

Impulsor de tipo Turbina Semiabierta



NOTA: Figura referencial obtenida de Direct Industry

La altura de las aletas estará determinada por un octavo del diámetro del rodete.

2.5.2.3. Tipos de Flujo en Tanques Agitados

El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado, depende del tipo de rodete, de las características del fluido y del tamaño y proporciones del tanque, placas deflectoras y agitador. La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes y el tipo de flujo global en el mismo, depende de las variaciones de estas tres componentes de la velocidad, de un punto a otro.

- La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del rodete.
- La segunda es longitudinal y actúa en dirección paralela al eje.
- La tercera es tangencial o rotacional, y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el rodete.

En un tanque sin placas deflectoras, el flujo circulatorio es inducido por todos los tipos de rodete, tanto si el flujo es axial como radial. Si los remolinos son intensos, el tipo de flujo dentro del tanque es esencialmente el mismo, independientemente del diseño del rodete.

Para velocidades de giro del rodete elevadas, la profundidad del vórtice puede ser tan grande que llegue al rodete mismo, dando lugar a que en el líquido se introduzca el gas que está encima de él, lo cual normalmente debe evitarse. (McCabe & Smith, 1968)

2.5.2.4. Placas Deflectoras

Estas son placas verticales perpendiculares a la pared del tanque. En tanques pequeños son suficientes 4 placas deflectoras, para evitar remolinos y formación de vórtice. El ancho de las placas no debe ser mayor que un doceavo del diámetro del tanque.

Cuando se usan agitadores de hélice, el ancho de la placa puede ser de un octavo del diámetro del tanque. Si el eje del agitador está desplazado del centro o inclinado, no se necesitan placas deflectoras.

El número de deflectores es de 4 en un diseño estándar, su espesor debe ser como máximo un doceavo del diámetro del tanque.

La separación lateral entre la pared interna del tanque y cada bafle debe ser un sexto del espesor de los deflectores.

La altura desde el fondo del tanque para la base del deflector debe ser la mitad del diámetro del rodete.

Cuando no se presentan remolinos, el tipo de flujo específico depende del tipo de rodete:

- Los agitadores de hélice impulsan el líquido hacia el fondo del tanque, desde donde la corriente se extiende subiendo por las paredes y retornando hacia la hélice. Se emplean cuando se desean intensas corrientes verticales.
- Los agitadores de paletas producen un flujo radial intenso en el plano próximo a las palas, pero prácticamente no dan lugar a corrientes verticales. Estos agitadores no son eficaces para mantener sólidos en suspensión.
- Los agitadores de turbina impulsan al líquido radialmente contra las paredes laterales del tanque, desde donde la corriente se divide, una parte fluye hacia arriba y otra parte hacia el fondo, retornando ambas al rodete. Por lo que producen dos corrientes de circulación separadas.

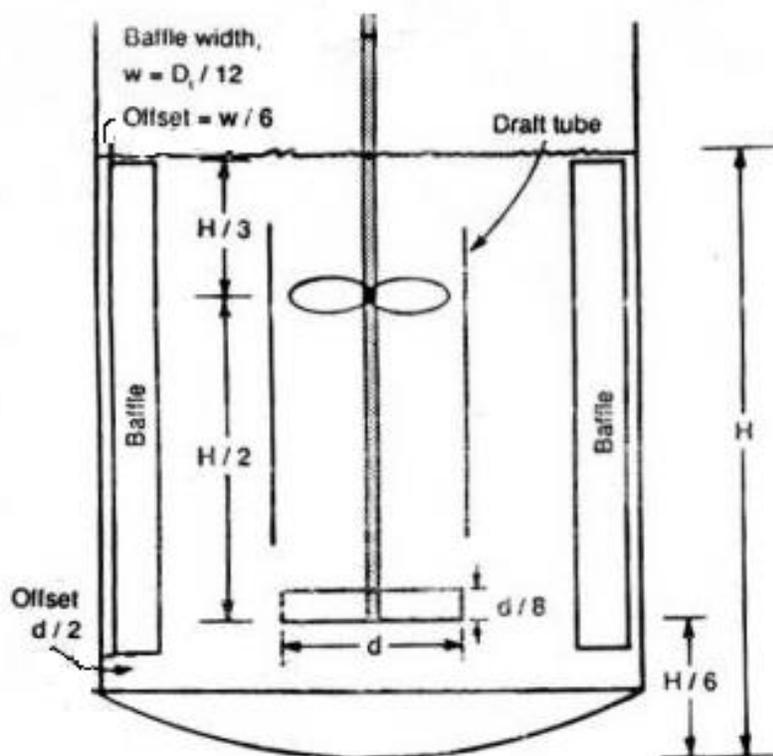
- Dan excelentes resultados en la mezcla de líquidos que tienen aproximadamente la misma densidad relativa. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 4)

Sin embargo, para evitar la formación de remolinos y poder omitir el colocado de baffles, se debe colocar el agitador apartado del centro geométrico del tanque o con cierta inclinación respecto a la perpendicular de la base.

Derksen, Doelman, & Van den en su investigación “Three Dimensional LDA measurements in the impeller region of a turbulently stirred tank”, en la **Figura 10** resumen las medidas convencionales de los tanques con agitación, los cuales derivan de la altura y diámetro interiores del tanque; los de alturas muy grandes respecto a sus diámetros poseen dos agitadores.

Figura 10

Tanque de Agitación con dimensiones típicas



Nota. Medidas características de los elementos que componen un tanque con agitación (Derksen, Doelman, & Van den, 1999)

2.6. Tratamiento de aguas residuales

2.6.1. Tratamiento Primario

Toda la serie de pasos que componen el tratamiento primario es llamada a veces clarificación. La meta de este proceso es retirar turbidez, partículas sólidas y materiales flotantes. Debido a que estos contaminantes interferirán con los procesos de tratamiento posteriores deben ser retirados con anterioridad.

2.6.1.1. Tanques de Sedimentación Primaria (Clarificadores)

El flujo del agua disminuye aún más cuando alcanza los Tanques de Sedimentación Primaria o Clarificadores. Estos son grandes receptáculos circulares o rectangulares que normalmente contienen el agua residual por varias horas. Pueden estar contruidos de concreto o de acero. Esto permite que ocurran dos cosas muy importantes. Primero, las partículas más pesadas que componen el lodo se asentarán en el fondo. Segundo, los materiales flotables más ligeros tales como la grasa y el cabello se elevarán a la superficie. Este tipo de residuos no son otra cosa que una capa flotante de impurezas. (Belzona Inc., 2010, pág. 5)

Los Clarificadores vienen en distintas disposiciones y pueden incorporar todos o algunos de los siguientes procesos. En todo caso, en todos ellos se encontrará algunas de las mismas maquinarias básicas de evacuación de lodos y de la capa de impurezas. Algunos de los procesos específicos que ocurren en el clarificador son los detallados a continuación.

2.6.1.1.1. Coagulación

Este es el agrupamiento de partículas finas para formar otras más grandes. Esto puede verse ayudado con el uso de coagulantes tales como el alumbre (sulfato de aluminio) y el cloruro de hierro. Algunos polímeros orgánicos y materiales de arcilla se usan también para estimular este proceso.

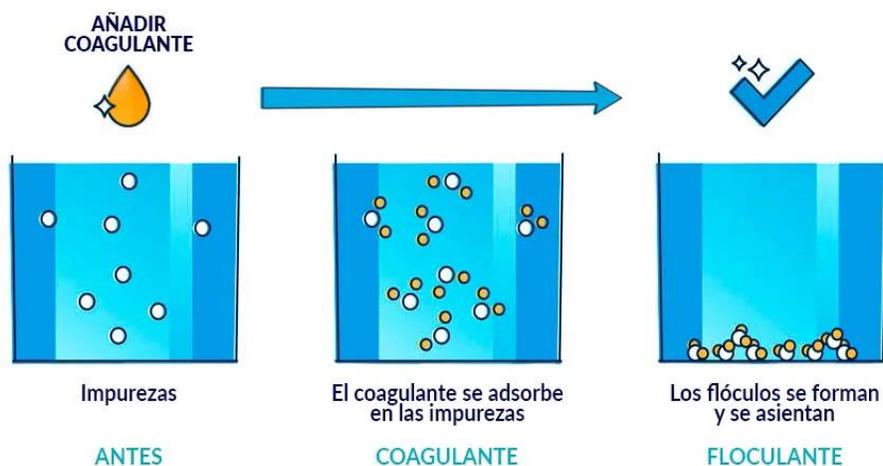
Una vez coaguladas, las partículas más grandes son más fáciles de retirar que las más pequeñas. Las partículas más grandes se convierten en un material llamado floculo. Este material esponjoso tiene un área de superficie más grande y ayuda más en el proceso de clarificación al atrapar partículas más pequeñas en su superficie.

2.6.1.1.2. Floculación

La floculación es la recolección de partículas pequeñas adicionales por el floculo. Esto es ayudado mecánicamente por las paletas rotantes y los escalones que realizan el mismo movimiento de rodillo que es más favorable para la floculación. El beneficio final de una floculación eficiente es un tiempo de detención reducido del agua residual en el clarificador (o tanque específico de floculación). Cualquier reducción en este tiempo permite una mayor capacidad general de la planta. (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002, pág. 3)

Figura 11

Esquema de acción del coagulante y floculante en el tratamiento de aguas residuales



Nota. Imagen ilustrativa referencial a los procesos de coagulación y floculación;

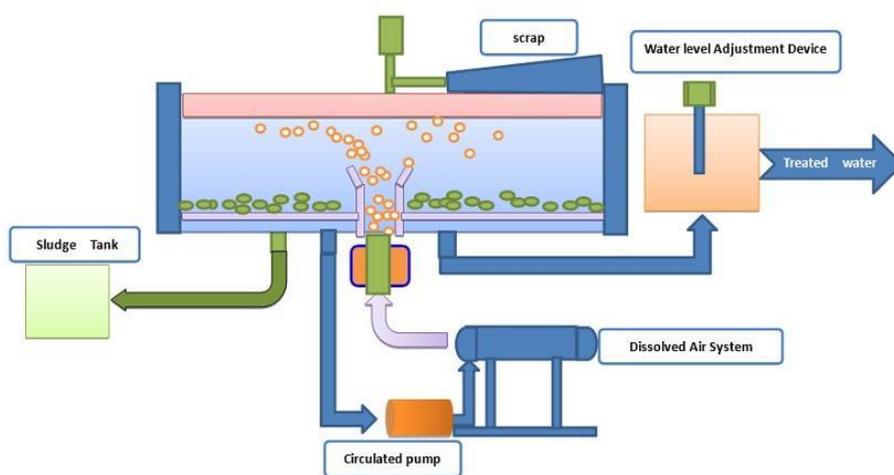
obtenida de LabProcess.

2.6.1.1.3. Flotación

La descripción simple de este proceso es asentamiento en reversa. Muchas burbujas pequeñas de aire flotando a través del agua se prenden de materia suspendida en el agua residual que va rotando suavemente. La materia luego flota hacia la superficie para una evacuación fácil depurando la capa superior.

Figura 12

Esquema de un equipo de flotación



Nota. Imagen ilustrativa referencial a los procesos de coagulación y floculación;

obtenida de la página LabProcess.

2.6.1.1.4. Separación por Gravedad

Este método de clarificación es especialmente útil para líquidos insolubles tales como aceites. Estos flotarán naturalmente a la superficie si se les da suficiente tiempo. Como mencionamos anteriormente, el tiempo es importantísimo en estos procesos, por lo que con frecuencia se usan químicos para acelerar la separación por gravedad y para descomponer las emulsiones agua/aceite más estables que puedan haberse formado.

Algunos de los mismos químicos formadores de flóculos o coágulos son también efectivos aquí.

La separación por gravedad puede ocurrir como parte del proceso de clarificación o como una unidad individual. Este último caso es de más uso en el tratamiento industrial de aguas residuales que en el uso municipal, especialmente cuando los aceites de maquinado componen buena parte del flujo residual.

2.6.1.1.5. Evacuación de Lodos

Un colector mecánico de lodos restriega el lodo asentado en el fondo de una tolva en la parte más baja del clarificador. El lodo es luego bombeado desde esta cavidad al sistema de tratamiento de lodos.

El colector está usualmente construido con una serie de restregadores prendido de un sistema de cadena impulsado por una cadena rotatoria sinfín. Todo el mecanismo rota en un circuito guiado por rieles de metal en el fondo y en las paredes del tanque.

2.6.1.1.6. Evacuación de la Capa Superficial de Impurezas (Scum)

En algunos sistemas, los mismos restregadores de lodos, a medida que rotan de regreso a la parte superior del tanque, mantendrán la capa superficial de impurezas moviéndose hacia su sistema de evacuación. Estos sistemas emplearán una rosca helicoidal o una tubería con casillas rotando en la superficie, al mismo nivel para atrapar la capa flotante que es empujada por los restregadores o los escalones.

Esta capa flotante se deriva hacia un canalón o cavidad para su eliminación. En otros sistemas, unos grandes depuradores o boquillas rociadoras de agua cruzan la superficie de todo el tanque empujando la capa superficial flotante hacia un controlador que la dirige a un vertedero de eliminación. (Aguilar, Sáez, Lloréns, Soler, & Ortuño, 2002, pág. 5)

CAPITULO 3.

3. Caracterización de las Aguas Residuales

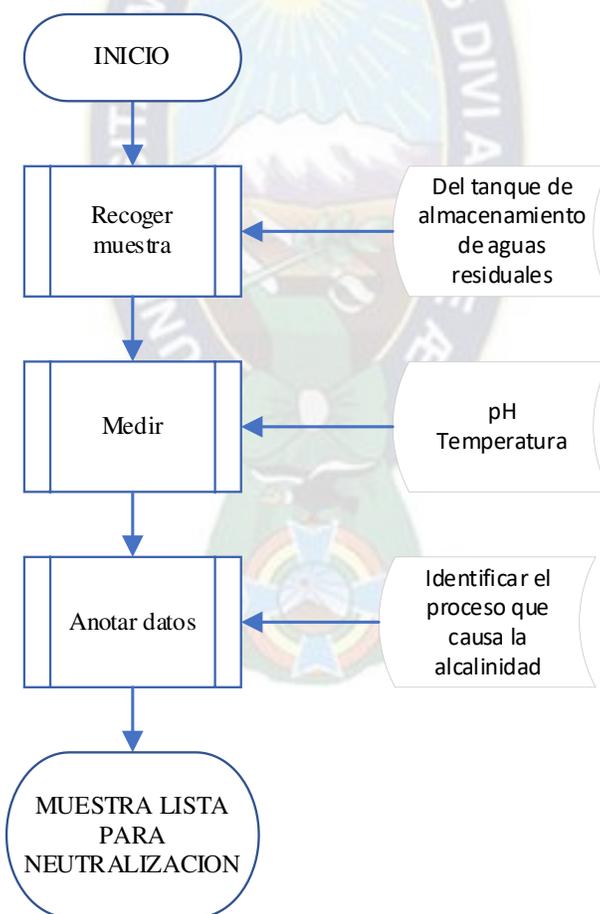
3.1. Recolección e identificación de muestras

Se recolectaron muestras puntuales durante 21 días para identificar el proceso que causa su alcalinidad y obtener un rango de pH de estos.

3.1.1. Metodología de recolección de muestras

Figura 13

Diagrama de Proceso para la Recolección de Muestras



Nota. Flujograma del proceso de Recolección de muestras

Tabla 5

Identificación de Muestras de Agua residual del descruce y blanqueo de diversas líneas de producción

DIA	pH	T (°C)	PROCESO PRODUCTIVO
1	11.74	62	Descruce y blanqueo de Algodón
2	11.52	68	Descruce y blanqueo de gasas
3	11.55	65	Descruce y blanqueo de gasas
4	11.40	67	Descruce y blanqueo de gasas
5	11.70	69	Descruce y blanqueo de algodón
6	11.41	70	Descruce y blanqueo de vendas
7	12.10	70	Descruce y blanqueo de Algodón
8	11.90	72	Descruce y blanqueo de Algodón
9	11.70	69	Descruce y blanqueo de gasas
10	11.10	68	Descruce y blanqueo de gasas
11	11.60	63	Descruce y blanqueo de gasas
12	12.05	67	Descruce y blanqueo de Algodón
13	11.45	66	Descruce y blanqueo de Gasas
14	11.68	60	Descruce y blanqueo de vendas
15	11.85	68	Descruce y blanqueo de Gasas
16	11.70	62	Descruce y blanqueo de Gasas
17	11.08	67	Descruce y blanqueo de Algodón
18	11.05	61	Descruce y blanqueo de Gasas
19	11.67	65	Descruce y blanqueo de Gasas
20	11.64	63	Descruce y blanqueo de Gasas
21	11.47	61	Descruce y blanqueo de Algodón

Nota. Realizado un muestreo puntual, se identificaron los procesos que producen Alcalinidad en el agua residual, teniendo una similar composición respecto a los reactivos en los procesos de descruce y blanqueo, tanto de algodón, gasas y vendas crudas, se obtiene un pH que no excede 12.10.

3.2. Caracterización de Muestras

Realizado el Informe de Análisis de Agua, se obtuvieron los siguientes parámetros para el agua residual industrial de la empresa:

Tabla 6

Informe de Análisis del Agua Residual

Parámetro	Unidades	Valor máximo aceptable*	Resultados
DBO ₅	mg/l	80	996.2
DQO	mg/l	250	4210.0
Aceites y grasas	mg/l	10	32.40
pH	Unidades de pH	6-9	11.49
Conductividad	μS/cm	---	7810
Sólidos suspendidos totales	mg/l	60	1568

Nota. Análisis de Laboratorio realizado en el Departamento de Control de Calidad EPSAS, esta tabla indica el análisis de una muestra compuesta de agua residual, dándonos como valor medio de pH 11.49.

*Límites permisibles para descargas líquidas Anexo A-2 Reglamento de la Ley de Medio Ambiente.

El valor de pH de la muestra compuesta nos ayudó a asumir un valor medio para trabajar con la adición de coagulante en el tratamiento primario del agua residual.

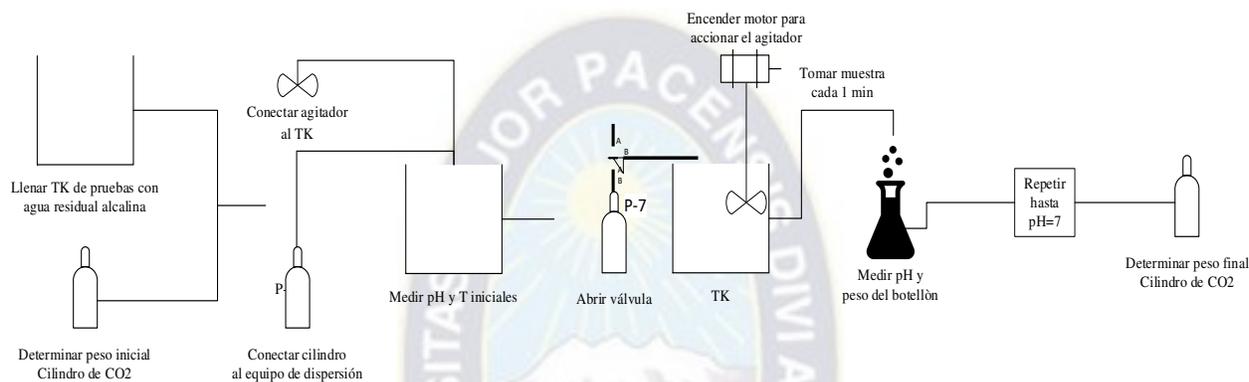
CAPITULO 4

4. Disminución del pH de las aguas residuales alcalinas con adición de CO₂

4.1. Metodología de dosificación

Figura 14

Diagrama de procesos para la neutralización de agua residual con CO₂



Nota. Diagrama referencial al proceso de neutralización

4.2. Dosificación de CO₂

Se empleó un volumen de 150 litros de agua residual alcalina para cada prueba, esta cantidad es adecuada para la disposición del tanque con el que contamos, además, con este valor se consigue una altura de 60.9 cm respecto a los 56 cm del diámetro; cubriendo un 67% de la altura de nuestro tanque para evitar rebalse en el proceso.

Debido a la mayor solubilidad de CO₂ a menores temperaturas, se obtuvieron los siguientes valores de consumo en masa de este gas, partiendo de una temperatura de 35.2°C, llegando a temperaturas que oscilan los 20°C.

Las pruebas se dividieron en dos fases, una con temperaturas más altas respecto a la segunda.

Tabla 7*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 35.2°C*

T=35,2°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,5	0
1	10,84	156,0
2	10,47	312,0
3	9,95	468,0
4	8,5	624,0
5	7,86	780,0
6	7,12	936,0

Nota. Temperatura más alta tomada en cuenta para las pruebas de dosificación de CO₂, se observó un alto consumo del gas respecto a las pruebas realizadas a temperaturas menores, se consumieron 936 g para neutralizar la muestra de 150 litros de agua residual.

Tabla 8*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 28.7°C*

T=28,7°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,64	0,0
1	11,01	165,0
2	9,82	330,0
3	9,05	495,0
4	7,15	660,0
5	6,87	825,0

Nota. La tabla nos muestra el comportamiento del pH respecto al tiempo y la adición de CO₂, a una temperatura de 28.7°C se observó disminución en el consumo para llegar a un pH de neutralización, se usaron 825 g de CO₂ para obtener un pH de 6.87.

Tabla 9

Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 28.2°C

T=28,2°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,47	0
1	10,79	206,3
2	9,53	412,5
3	7,42	618,8
4	6,69	825,0

Nota. A una temperatura de 28.2°C se observó igual consumo que en la temperatura 28.7°C, en este caso disminuyendo a un pH de 6.69.

Tabla 10

Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 25.5°C

T=25,5°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	10,67	0
1	9,38	224,7
2	8,5	449,3
3	6,74	674,0

Nota. A una temperatura de 25.5°C continúa la disminución del consumo del gas, para obtener un pH de valor 6.74 se consumieron 674 g de CO₂.

Con estas pruebas se demuestra efectivamente, menor demanda de gas CO₂ a temperaturas más bajas, comprobando que se tiene mayor solubilidad de los gases en líquidos a menores temperaturas.

Siendo la solubilidad inversamente proporcional a la temperatura de operación.

Tabla 11*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 25.6°C*

T=25,6°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,1	0
1	9,9	92,1
2	9,3	184,3
3	9,05	276,4
4	8,42	368,6
5	8,08	460,7
6	7,35	552,9
7	7,05	645,0

Nota. A una temperatura de 25.6°C se observa similar consumo a la temperatura de 25.5°C, en este caso se demandaron 645 g de gas para llegar a un pH de 7.05.

Tabla 12*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 23°C*

T=23°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,25	0,0
1	9,89	113,5
2	8,86	227,0
3	7,13	340,5
4	6,54	454,0

Nota. A una temperatura de 23°C continúa la disminución del consumo de gas CO₂, la Tabla 12 nos muestra la rebaja progresiva del pH con el aumento de este gas, observamos que para obtener un pH de 6.54 en este caso se consumieron 454 g.

La Tabla 13 nos muestra la temperatura más baja obtenida en los procesos de neutralización con CO₂, representando una pauta para la segunda fase de pruebas.

Tabla 13

Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 20.1°C

T=20,1°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,32	0,0
1	10,7	47,2
2	9,58	94,4
3	7,56	141,6
4	7,06	188,8
5	6,72	236,0

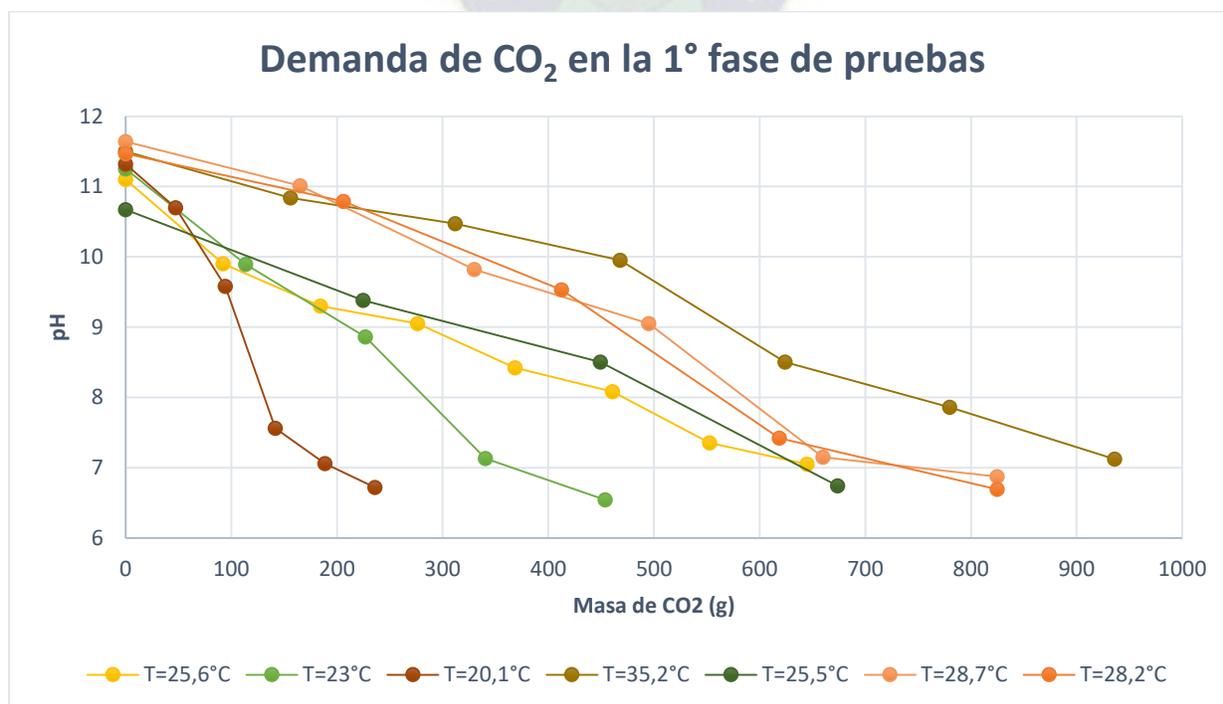
Nota. Esta fue la temperatura mínima obtenida para la realización de pruebas de Neutralización, a partir de la misma, la segunda fase de pruebas se realizó en este intervalo.

4.2.1. Demanda de CO₂ en la primera fase

La primera fase de pruebas empezó con una temperatura de 35.2°C y se llegó a 20.1°C, se obtuvo la siguiente gráfica que muestra las pendientes obtenidas a distintas temperaturas.

Gráfica 1

Demanda de CO₂ para el proceso de Neutralización a diferentes Temperaturas, 1° fase de pruebas



Nota. Comprobando la bibliografía en nuestra primera etapa de pruebas, se obtuvo que la demanda de CO₂ a 20.1°C, es de 236 gCO₂ para 150 litros de agua residual alcalina y observando la **Gráfica 1** se tiene una mayor pendiente en el proceso de neutralizado, por lo tanto, las siguientes mediciones se realizaron en función a este intervalo de temperatura.

Tabla 14

Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 23.5°C

T=23,5°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,25	0
1	9,89	118,3
2	8,86	236,5
3	7,13	354,8
4	6,54	473,0

Nota. Masa de gas consumida por el agua residual una temperatura de 23.5°C para lograr su neutralización, 473 g de CO₂ disminuyeron el pH a un valor de 6.54.

Tabla 15

Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 22°C

T=22°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,1	0
1	9,9	49,6
2	9,3	99,1
4	8,42	198,3
5	8,08	247,9
6	7,35	297,4
7	7,05	347,0

Nota. Masa de gas consumida por el agua residual una temperatura de 22°C para lograr su neutralización

Tabla 16*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 21.2°C*

T=21,2°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,5	0
1	10,84	40,7
2	10,47	81,3
3	9,95	122,0
4	8,5	162,7
5	7,86	203,3
6	7,12	244,0

Nota. Masa de gas consumida por el agua residual una temperatura de 21.2°C para lograr su neutralización, en este caso se emplearon 244 g de gas para obtener un pH de 7.12.

Tabla 17*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 20.7°C*

T=20,7°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	12,05	0
1	11,01	49,6
2	9,82	99,2
3	9,05	148,8
4	7,15	198,4
5	6,87	248,0

Nota. Masa de gas consumida por el agua residual una temperatura de 20.7°C para lograr su neutralización, en este caso se emplearon 248 g de gas para obtener un pH de 6.87.

Conforme la temperatura va disminuyendo, efectivamente se tiene menor consumo de gas para llegar a valores neutrales o cercanos al neutral de pH.

Tabla 18*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 20.5°C*

T=20,5°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,62	0
1	9,38	80,0
2	8,5	160,0
3	6,74	240,0

Nota. Masa de gas consumida por el agua residual una temperatura de 20.5°C para lograr su neutralización

Tabla 19*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 20.5°C*

T=20,5°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,78	0
1	10,71	50,6
2	9,58	101,2
3	7,56	151,8
4	7,06	202,4
5	6,72	253,0

Nota. Masa de gas consumida por el agua residual una temperatura de 20.5°C para lograr su neutralización

Tabla 20*Demanda de CO₂ para neutralizar agua residual a 20.2°C*

T=20,2°C		
t (min)	pH	masa (g)
0	11,74	0
1	10,79	59,8
2	9,53	119,5
3	7,42	179,3
4	6,69	239,0

Nota. La interpretación se refiere a la masa de gas consumida por el agua residual a una temperatura de 20.2°C para lograr su neutralización, esta fue la temperatura más baja registrada en la segunda fase.

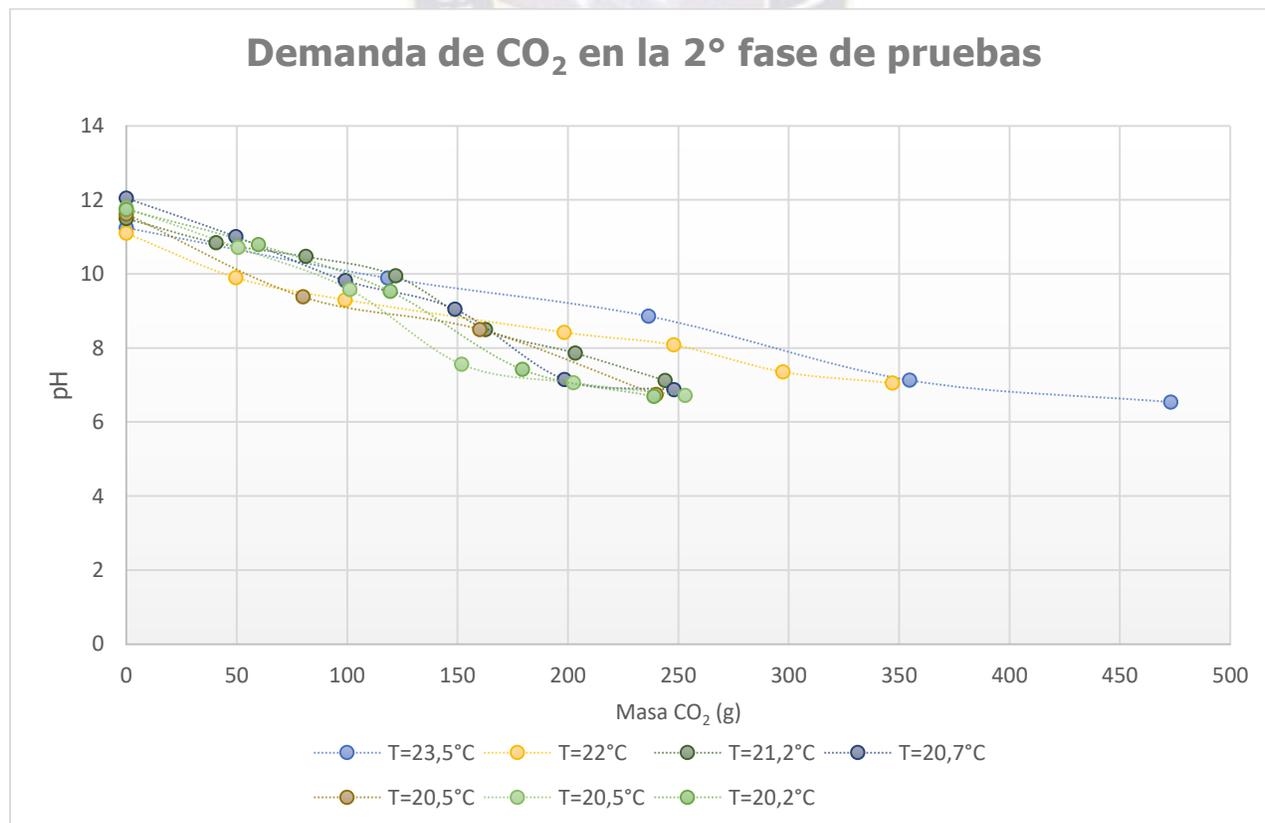
4.2.2. Demanda de CO₂ en la segunda fase

Para una segunda fase de pruebas aplicada a las temperaturas más bajas obtenidas en el enfriamiento, se observó menor consumo del gas para llevar a cabo la neutralización.

Se trataron muestras de descruce y blanqueo, tanto de gasas, vendas y algodón o la mezcla de estas, pero se observó que el rango de menor consumo de gas es obtenido a partir de 21.2°C para abajo; las mismas son las que se usaron para determinar la dosificación adecuada de coagulante.

Gráfica 2

Demanda de CO₂ para el proceso de Neutralización a diferentes Temperaturas, 2° fase de pruebas



Nota. En la Gráfica 2 se observa similar comportamiento en la disminución de pH respecto a la adición de masa de CO_2 en las pruebas de neutralización realizadas por debajo de la temperatura de 21.2°C ; por lo tanto, a comparación de la anterior gráfica se observa claramente menor demanda de gas CO_2 para obtener valores de pH de neutralización.



CAPITULO 5

5. Propuesta de un equipo adecuado para la mayor dispersión de CO₂ en el agua residual

Esta propuesta fue realizada en base al tanque dispuesto por la empresa para la realización de las pruebas; este ya cuenta con dimensiones determinadas respecto a su altura y diámetro interno, sin embargo, el tipo de agitador, su diámetro, el colocado de baffles y el sistema de dispersión de gas se propusieron en base a dimensiones estándar para agitadores.

5.1. Dimensiones estándar para equipos de agitación

El artículo de investigación redactado por Derksen, Doelman y Van den el cual titula “Three Dimensional LDA measurements in the impeller region of a turbulently stirred tank” nos provee dimensiones estándar para los elementos que componen un equipo de agitación.

Siendo:

$H =$ *Altura del liquido en tanque*

$D =$ *Diámetro interno del tanque*

$d =$ *Diámetro del agitador*

$w =$ *Espesor de baffle*

5.1.1. Agitador

El tipo de agitador se definirá dependiendo de la naturaleza de los fluidos que se pongan en contacto, tomando en cuenta, su viscosidad, densidad, estado de agregación, etc.

El diámetro del mismo estará definido cumpliendo determinado porcentaje del diámetro interno del tanque que lo contiene; teniendo en cuenta los tres tipos de agitadores que se tienen, de hélice, de paleta y tipo turbina. (Treybal, 1997, pág. 166)

5.1.2. Altura de aletas del rodete

La altura de las paletas del rodete serán un octavo del diámetro del agitador. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 5)

$$\text{Altura aletas} = \frac{d}{8}$$

5.1.3. Distancia entre la base del tanque y el rodete

Esta altura estará determinada por un sexto de la altura de líquido en el tanque. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 5)

$$\text{Distancia entre la base del tanque y el rodete} = \frac{H}{6}$$

5.1.4. Distancia entre los baffles y la base del tanque

Esta distancia determinada por un medio del diámetro del agitador. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 6)

$$\text{Distancia entre baffles y base del tanque} = \frac{d}{2}$$

5.1.5. Ancho de baffle

El ancho de cada baffle será el mismo y su medida estándar es de un doceavo del diámetro interno del tanque. Sin embargo, la cantidad de baffles estándar es de 4, dispuestos a igual distancia uno de otros dentro la pared del tanque. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 6)

$$w = \frac{D}{12}$$

5.1.6. Separación entre los baffles y la pared del tanque

Esta distancia estará determinada por un sexto del ancho de baffle. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 6)

5.2. Metodología

Al tener un tanque dispuesto para este propósito en la empresa, los elementos que lo componen se derivaron de las dimensiones de este.

- Medir dimensiones del tanque puesto a disposición por la empresa (diámetro interno y altura).
- Seleccionar tipo de agitador (Para mejor transferencia de masa Gas-Líquido, adecuado para la viscosidad del agua residual).
- Elegir tipo de agitador “Turbina semiabierta” (con un diámetro de rodete que ocupe entre el 30 y 50% del diámetro del tanque).
- Calcular la altura de las aletas del rodete (un octavo del diámetro del rodete).
- Calcular altura del rodete respecto del tanque (Un sexto de la altura del tanque).
- Calcular espesor de los baffles (entre un décimo y una doceava parte del diámetro del tanque).
- Calcular offset de baffles (Un sexto del espesor de baffle)
- Disponer un dispersor de gas con un diámetro similar al diámetro del rodete del agitador
- Poner orificios de 3 a 6 mm separados 1 cm uno del otro.

5.3. Propuesta de Equipo de Agitación

La propuesta del equipo con sistema de agitación para el contacto gas-liquido entre el dióxido de carbono y el agua residual alcalina, se realizó en base a un tanque de aproximadamente 200 litros de capacidad con el que se cuenta en la empresa ALBUS S.A., en base a las dimensiones del mismo y la bibliografía relacionada se plantearon las medidas del rodete inicialmente y de la cual fueron derivando las demás.

5.3.1. Tanque para pruebas

La empresa dispuso de un tanque para realizar las pruebas de neutralización, mismo que se escogió por estar dentro del área de la planta de tratamiento de aguas residuales, además de estar conectado directamente al sistema DAF usado en el tratamiento primario de las mismas.

Este es el tanque de mayor capacidad de una serie de 3 tanques usados para el enfriamiento previo del agua residual; los cuales, junto al tanque reservorio alimentan de agua residual alcalina a la planta de tratamiento de aguas residuales, empezando con el tratamiento primario en el sistema de separación de partículas sólidas, grasas y aceites (DAF).

5.3.2. Dimensiones del tanque base para implementar el equipo de dispersión de CO₂

El tanque que dispuso la empresa para realizar las pruebas pertinentes tiene una capacidad de 221,67 litros exactamente, con las siguientes dimensiones:

- Altura (h): 90 cm
- Diámetro interno (d): 56 cm

El mismo, es de material plástico y cuenta con una pared de espesor de 2 cm, es resistente a los golpes y a la corrosión.

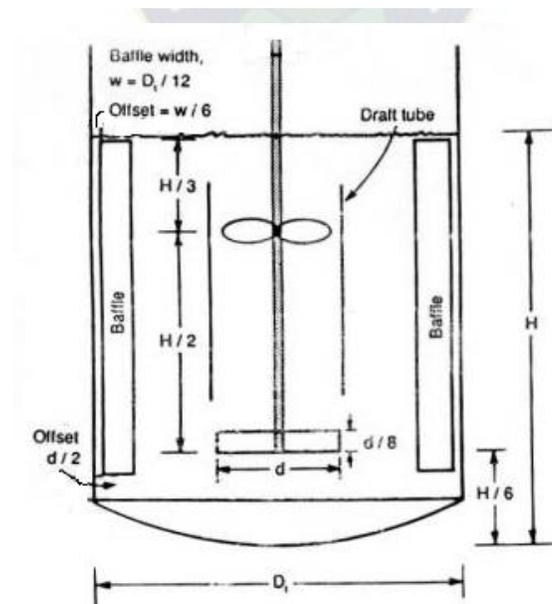
En base a sus dimensiones se realiza la propuesta para la implementación del equipo de agitación y dispersión del CO₂.

Figura 15

Tanque Base para la Propuesta



Nota. Tanque dispuesto para las pruebas de dosificación de CO₂ en INDUSTRIAS ALBUS S.A.



Nota. Dimensiones estándar de un sistema de agitación (Derksen,

Doelman, & Van den, 1999)

5.3.3. Dimensiones propuestas para el equipo mecánico y dispersor de gas

5.3.3.1. Equipo Mecánico

Según lo propuesto en bibliografía para tener un mejor contacto gas-líquido se tomaron las siguientes atribuciones:

- Se propone un agitador de tipo turbina semi-abierto, este es adecuado para el contacto de gases con líquidos y para lograr una mejor transferencia de materia debido a la forma de sus aletas, ayudando a una mejor mezcla del CO₂ con el agua residual, el mismo debe tener un diámetro de rodete entre el 30% y 50% del diámetro del tanque. (Treybal, 1997, pág. 174)
- El rodete de una turbina semiabierto debe tener 6 aletas, las cuales deberán tener una altura equivalente a un octavo del diámetro del mismo. (McCabe & Smith, 1968, pág. 258)
- La altura del rodete respecto del burbujeador debe ser un sexto de la altura del tanque. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 5)
- El espesor de baffle debe tener un décimo del diámetro del tanque y el equipo debe contar con un total de cuatro. (McCabe & Smith, 1968, pág. 256)
- La separación entre la pared interna del tanque y los baffle tendrá que ser un sexto del espesor de cada baffle. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 6)

5.3.3.2. Dispersor de Gas

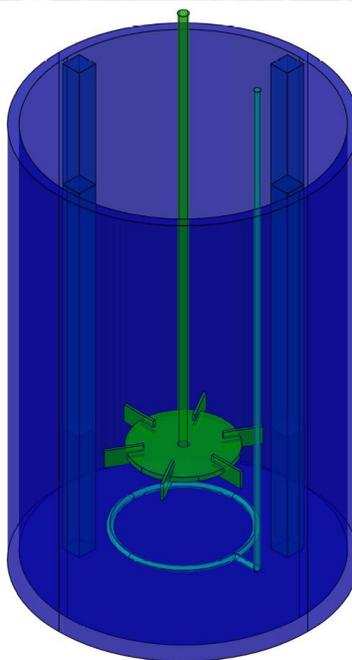
- El gas se introducirá por debajo del rodete del impulsor mediante un burbujeador en forma de anillo con un diámetro igual o ligeramente más pequeño que el rodete. (Treybal, 1997, pág. 162)

- Los orificios para la salida del gas serán de un diámetro de 3 a 6.5 mm, separados una distancia superior al doble del diámetro elegido. (Treybal, 1997, pág. 171)
- Se debe obtener un número Reynolds superior a 10000, aunque no es precisamente importante debido a que, al tener una alimentación de gas a alta presión y la acción del agitador, se crea suficiente turbulencia para tener un valor de Reynolds elevado. (Treybal, 1997, pág. 172)
- La distancia entre el rodete y el burbujeador será de un sexto de la altura de tanque.
- La altura del burbujeador respecto de la base será de un tercio de la distancia entre el rodete y el burbujeador. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 6)

5.3.3.3. Vista isométrica del equipo propuesto

Figura 16

Vista Isométrica del sistema de agitación



Nota. Vista isométrica del equipo propuesto, elaborado con el programa AutoCad

5.3.3.4. Dimensiones necesarias para el equipo de agitación mecánica

Tabla 21

Dimensiones de los elementos del equipo propuesto en base a las dimensiones del tanque

DIMENSIONES DEL TANQUE		
Altura	90	cm
Diámetro interno	56	cm
Impulsor tipo	TURBINA SEMI-ABIERTA	
Rodete	50% del	Diámetro interno
Diámetro Rodete	28	cm
Aletas del rodete	6	
Altura de aletas	3,5	cm
Altura del rodete respecto del burbujeador	15	cm
Baffles	4	
Espesor de baffle	5,6	cm
Distancia entre baffle y pared interna del tanque	0,93	cm
Dispersor de gas	BURBUJEADOR TIPO ANILLO	
Diámetro del dispersor	25	cm
Diámetro orificios	0,3	cm
Separación entre orificios	1	cm

Nota. Resumen de las características y dimensiones propuestas para el equipo de agitación ideal, en base al tanque dispuesto en INDUSTRIAS ALBUS S.A. y dimensiones estándar.

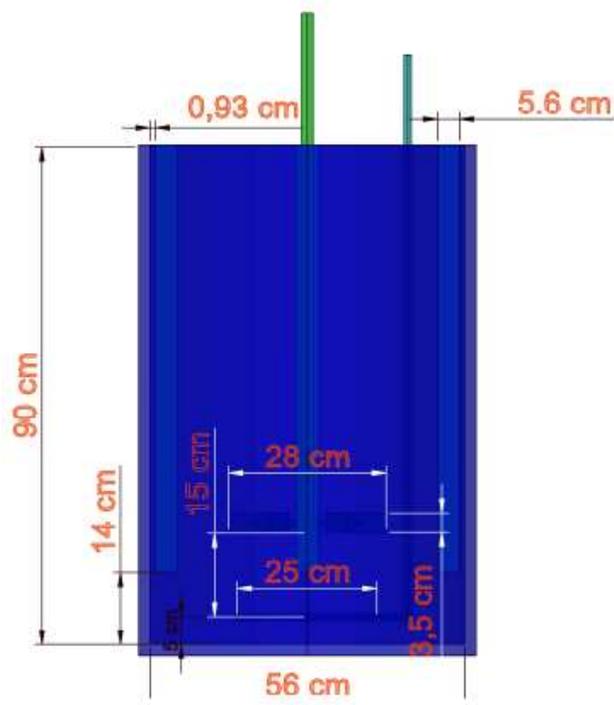
Las dimensiones propuestas en la **Tabla 21** se encuentran en base a bibliografía, se comenzó eligiendo el tipo de agitador adecuado para este propósito y ya habiendo realizado la medición de las dimensiones del tanque, se obtuvieron las medidas de los elementos faltantes siguiendo las dimensiones estándar de un sistema de agitación.

5.3.4. Esquema propuesto

Realizados los cálculos se elaboró un esquema en AutoCAD de la propuesta, la cual muestra las dimensiones empleadas y una vista isométrica del equipo de agitación mecánica.

Figura 17

Esquema con Dimensiones



Nota. Esquema del sistema de agitación propuesto con las dimensiones específicas



CAPITULO 6

6. Armado del Equipo Propuesto

6.1. Implementación del equipo para neutralización

La empresa dispuso de un tanque para llevar a cabo las pruebas de dispersión de CO₂, el cual se acondicionó para las mismas, se cambiaron algunos parámetros de los inicialmente propuestos debido a que se vieron innecesarios al momento de haber iniciado las pruebas o se contaban con materiales distintos para poder ser implementados.

6.1.1. Nuevas atribuciones para el equipo de neutralización

6.1.1.1. Equipo Mecánico

Según lo propuesto en bibliografía, se realizaron las siguientes variaciones:

- Se cuenta con un agitador de tipo hélice que se emplea para fluidos poco viscosos, ideal para la mayoría de casos de contacto de fluidos. (McCabe & Smith, 1968, pág. 162)
- La altura del rodete respecto del burbujeador debe ser un sexto de la altura del tanque. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 4)
- No se dispusieron de baffles debido a que el tanque del cual disponemos es de material plástico y se colocó el rodete del agitador fuera del eje central del tanque para evitar la formación de remolinos. (McCabe & Smith, 1968, pág. 159)

6.1.1.2. Dispensor de Gas

- El gas se introdujo por debajo del rodete del impulsor mediante un burbujeador en forma de anillo con un diámetro ligeramente más pequeño que el rodete. (Treybal, 1997, pág. 171)

- Los orificios para la salida del gas se dispusieron de un diámetro de 3 mm, separados una distancia de 1 cm, el cual es superior al doble del diámetro elegido que tendría un valor de 6 mm. (Treybal, 1997, pág. 173)
- La distancia entre el rodete y el burbujeador es de 15 cm, que provienen de un sexto de la altura de nuestro tanque de 90 cm.
- La altura del burbujeador respecto a la base del tanque es de 5 cm, que provienen de un tercio de la distancia entre el rodete y el burbujeador de 15 cm. (Derksen, Doelman, & Van den , 1999, pág. 5)

6.1.1.3. Dimensiones necesarias para el equipo de agitación mecánica

La siguiente tabla muestra las dimensiones del equipo que se emplearon:

Tabla 22

DIMENSIONES DEL EQUIPO IMPLEMENTADO

DIMENSIONES DEL TANQUE		
Altura	90	cm
Diámetro interno	56	cm
Impulsor tipo	HELICE	
Rodete	Aprox 30% del	Diámetro interno
Diámetro Rodete	20	cm
Aletas del rodete	6	
Altura del rodete respecto del burbujeador	15	cm
Dispensador de gas	BURBUJEADOR TIPO ANILLO	
Diámetro del dispensador	25	cm
Diámetro orificios	0,3	cm
Separación entre orificios	1	cm

Nota. Tabla resumen de las características implementadas en el equipo de neutralización

Figura 19

Vista del tanque, burbujeador y agitador



Nota. Fotografía del equipo implementado, se observa el botellón de CO₂ conectado al dispersor de gas, al otro extremo se observa el agitador conectado al motor.

Figura 18

Tanque de Neutralización en proceso de dosificación y agitación



Nota. Fotografía del equipo en funcionamiento, se observa la turbulencia generada por la dosificación del CO₂ y la acción del agitador (se observa el agitador que no está dispuesto en el centro geométrico del tanque).

CAPITULO 7

7. Determinación de las condiciones de operación óptimas para el proceso

7.1. Cálculos en la Dosificación del CO₂

7.1.1. Ley de Henry

Se hicieron los cálculos respectivos para diferentes temperaturas, basados en los datos de la **Tabla 3** para hallar la concentración de CO₂ por litro de H₂O, aplicando una presión de 495 mmHg.

Tabla 23

Datos considerados en los cálculos

DATOS			
P	495	mmHg	
ρ (H₂O)	1000	g/l	= 55,56 mol/l
M (H₂O)	18	g/mol	
M (CO₂)	44	g/mol	

Nota. Datos considerados para la ciudad de La Paz, donde se ubica INDUSTRIAS ALBUS S.A.

Se usó la ecuación de Henry para determinar la concentración de CO₂ en el agua:

$$C = \frac{P}{k_H}$$

7.1.1.1. Cálculo de la concentración de CO₂ en el agua a 20°C

$$C = \frac{495 \text{ mmHg}}{1.08 * 10^6 \text{ mmHg} \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{molCO}_2}} * 55.56 \frac{\text{molH}_2\text{O}}{\text{l H}_2\text{O}} * 44 \frac{\text{g CO}_2}{\text{molCO}_2} = 1.12 \frac{\text{g CO}_2}{\text{l H}_2\text{O}}$$

Con base a este cálculo a 20°C, se realiza una tabla de concentraciones de CO₂ obtenidas para diferentes temperaturas.

La siguiente tabla muestra los valores de concentración de CO₂ a diferentes temperaturas:

Tabla 24

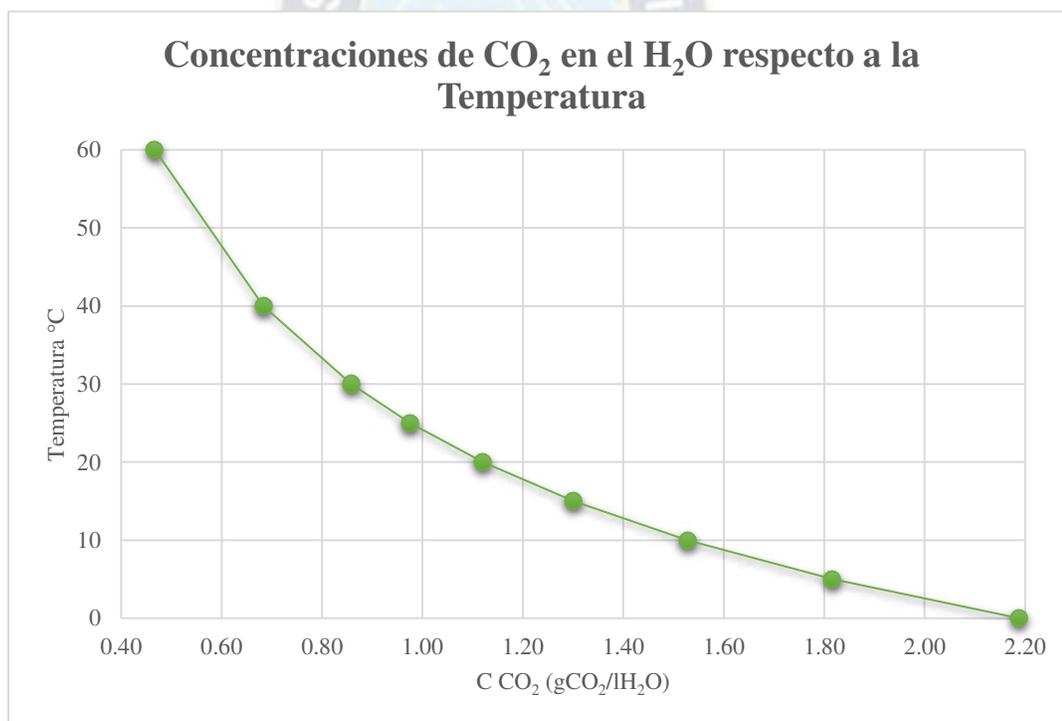
Concentraciones teóricas de CO₂ en el H₂O

T (°C)	0	5	10	15	20	25	30	40	60
k (CO ₂) (mmHg* $\text{molH}_2\text{O}/$ molCO_2)	5,5E+	6,6E+	7,9E+	9,3E+	1,0E+	1,2E+	1,4E+	1,8E+	2,6E+
C (gCO ₂ /lH ₂ O)	2,188	1,817	1,528	1,301	1,120	0,976	0,858	0,684	0,467

Nota. En base a los datos bibliográficos obtenidos para las constantes de Henry, se obtuvieron las concentraciones de CO₂ en el agua a diferentes temperaturas para la presión atmosférica de la ciudad de La Paz.

Gráfica 3

Concentraciones teóricas de CO₂ en el H₂O respecto a la Temperatura



Se elaboró la **Gráfica 3** en base a las concentraciones teóricas de CO₂ en el agua con la presión atmosférica de nuestra ciudad a 495 mmHg.

7.2. Cálculos teóricos de concentración de CO₂ para las muestras recolectadas

Se realizaron 14 pruebas de dosificación de CO₂ al agua residual a distintas temperaturas de operación, partiendo de 35.2°C hasta 20.2°C.

Los datos obtenidos teóricamente van en intervalos de temperatura de 5 Y 10°C, nuestras muestras se aplicaron a temperaturas dentro de estos intervalos y, según la **Gráfica 2** entre cada intervalo podríamos aproximar un comportamiento lineal en los datos, por lo tanto, se aplicó una interpolación a los mismos para determinar los valores de las concentraciones desconocidas.

Tabla 25

Concentraciones teóricas de CO₂ para las pruebas realizadas en la primera fase

T (°C)	35,2	28,7	28,2	25,5	25,6	23	20,1
C (gCO₂/lH₂O)	0,767	0,889	0,901	0,964	0,962	1,034	1,117

Nota. La tabla detalla las concentraciones de CO₂ teóricas para la primera fase de muestras del proceso de neutralización a presión atmosférica de 495 mmHg.

Tabla 26

Concentraciones teóricas de CO₂ para las pruebas realizadas en la segunda fase

T (°C)	23,5	22	21,2	20,7	20,5	20,5	20,2
C (gCO₂/lH₂O)	1,019	1,063	1,086	1,100	1,106	1,106	1,115

Nota. La tabla detalla las concentraciones de CO₂ teóricas para la segunda fase de muestras del proceso de neutralización a presión atmosférica de 495 mmHg.

7.3. Masa de CO₂ teórico requerido a distintas temperaturas

Realizados los cálculos de la concentración teórica de CO₂ en agua mediante la Ley de Henry, se multiplicaron los mismos, por el volumen de muestra que fue de 150 litros en cada una.

Tabla 27

Primera Fase de Masas teóricas de CO₂ que pueden disolverse en 150 l de H₂O

T (°C)	35,2	28,7	28,2	25,5	25,6	23	20,1
CO ₂ teórico (g)	115,11	133,31	135,08	144,61	144,25	155,04	167,62

Nota. La tabla detalla la masa de CO₂ teórica que puede disolverse en agua para cada ensayo de la primera fase de neutralización.

Tabla 28

Segunda Fase de Masas teóricas de CO₂ que pueden disolverse en 150 l de H₂O

T (°C)	23,5	22	21,2	20,7	20,5	20,5	20,2
CO ₂ teórico (g)	152,88	159,38	162,85	165,02	165,89	165,89	167,19

Nota. La tabla detalla la masa de CO₂ teórica que puede disolverse en agua para cada ensayo de la segunda fase de neutralización.

Las tablas 27 y 28 nos muestran que, mientras va disminuyendo la temperatura se obtiene una mayor cantidad de CO₂ que puede disolverse en agua.

7.4. Eficiencia de la Absorción de CO₂ en el agua residual

Obtenidas las cantidades máxicas teóricas de CO₂ que pueden disolverse en 150 litros de agua, las mismas, se compararon con las masas experimentales en cada prueba y se realizó un cálculo de eficiencia de absorción para determinar en qué grado es eficiente el equipo diseñado.

La eficiencia se refleja por la siguiente fórmula:

$$Eficiencia = \frac{CO_2 \text{ teórico (g)}}{CO_2 \text{ experimental (g)}} * 100\%$$

Tabla 29*Eficiencias de Absorción de CO₂, primera fase de pruebas*

T (°C)	35,2	28,7	28,2	25,5	25,6	23	20,1
CO ₂ teórico (g)	115,11	133,31	135,08	144,61	144,25	155,04	167,62
CO ₂ experimental (g)	936	825	825	674	645	454	236
Exceso (g)	820,89	691,69	689,92	529,39	500,75	298,96	68,38
Eficiencia (%)	12,30	16,16	16,37	21,45	22,36	34,15	71,03

Nota. La tabla detalla la eficiencia de absorción de CO₂, comparando el valor teórico obtenido respecto al consumo real que se tuvo en cada prueba.

Tabla 30*Eficiencias de Absorción de CO₂, segunda fase de pruebas*

T (°C)	23,5	22	21,2	20,7	20,5	20,5	20,2
CO ₂ teórico (g)	152,88	159,38	162,85	165,02	165,89	165,89	167,19
CO ₂ experimental (g)	473	347	244	248	240	253	239
Exceso (g)	320,12	187,62	81,15	82,98	74,11	87,11	71,81
Eficiencia (%)	32,32	45,93	66,74	66,54	69,12	65,57	69,95

Nota. La tabla detalla la eficiencia de absorción de CO₂, comparando el valor teórico obtenido respecto al consumo real que se tuvo en cada prueba.

Según los datos obtenidos de Eficiencia de Absorción de CO₂ en ambas etapas se aprecia que, se tiene un mayor porcentaje a temperaturas más bajas.

7.5. Determinación de las Condiciones óptimas de operación

7.5.1. Análisis de Varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

Para este punto se realizó un Análisis de varianza, tomando en cuenta dos factores:

- la temperatura de trabajo y
- la masa añadida en gramos

Y como Respuesta, el valor del pH medido en estas condiciones.

Para ello, se tomaron solamente los datos de las pruebas en los puntos más bajos que, según los demostrado en las **Tablas 29 y 30** eran los que reflejaban una mayor eficiencia respecto a la absorción del CO₂ en el H₂O.

Tabla 31

Datos para el análisis de Varianza con dos factores y una sola muestra por grupo

	m0 = 0 g	m1 = 50 g	m2 = 100 g	m3 = 150 g	m4 = 200 g
T1 = 20,1°C	11,32	10,63	9,34	7,47	6,98
T2 = 21,2°C	11,5	10,75	10,23	8,95	7,91
T3 = 20,7°C	12,05	11,01	9,82	9,01	7,1
T4 = 20,5°C	11,78	10,72	9,61	7,62	7,09
T5 = 20,2°C	11,7	10,94	9,94	8,45	7,17

Nota. La tabla detalla los valores de pH obtenidos, respecto a la adición de CO₂ a diferentes temperaturas.

7.5.1.1. Hipótesis Nula e Hipótesis Alterna

La Hipótesis Nula (H₀) nos plantea que, no existe diferencia entre la temperatura de trabajo y la adición de CO₂ para la obtención de determinado valor de pH.

La Hipótesis Alterna (H_A) nos plantea que, si existe variación entre al menos 1 par de relaciones entre la temperatura de trabajo y la adición de CO₂ para la obtención de determinado valor de pH.

7.5.1.2. Aceptación o Rechazo de la Hipótesis Nula

7.5.1.2.1. Probabilidad (p) respecto al nivel de significancia (α)

Si el valor de $p \leq \alpha$: Las diferencias entre algunas de las medias son estadísticamente significativas; es decir, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que no todas las medias de población son iguales.

Si el valor de $p > \alpha$: Las diferencias entre las medias no son estadísticamente significativas; es decir, no se cuenta con suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula y se concluye que no todas medias de población son iguales. (Gutierrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008, pág. 147)

7.5.2. Aplicación del Método

Se introdujeron los datos al programa Excel, el cual nos brindó los valores necesarios para determinar si la Hipótesis Nula se acepta o se rechaza.

El valor del nivel de significancia (α) aplicado fue de 0.05:

Tabla 32

Análisis de Varianza

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Temperaturas	1,83001	4	0,457504	4,318458	0,014730	3,006917
Adición de CO ₂ (g)	64,9510	4	16,237774	153,2711	1,540E-12	3,006917
Error	1,69506	16	0,1059415			
Total	68,4761	24				

Nota. Tabla obtenida con el programa Excel, aplicando la función de Análisis de Varianza de dos factores con una sola muestra por grupo

Según los datos obtenidos en la tabla:

- $0,014730 < 0.05$
- $1,540E-12 < 0.05$

Complementario a esto, se tiene que:

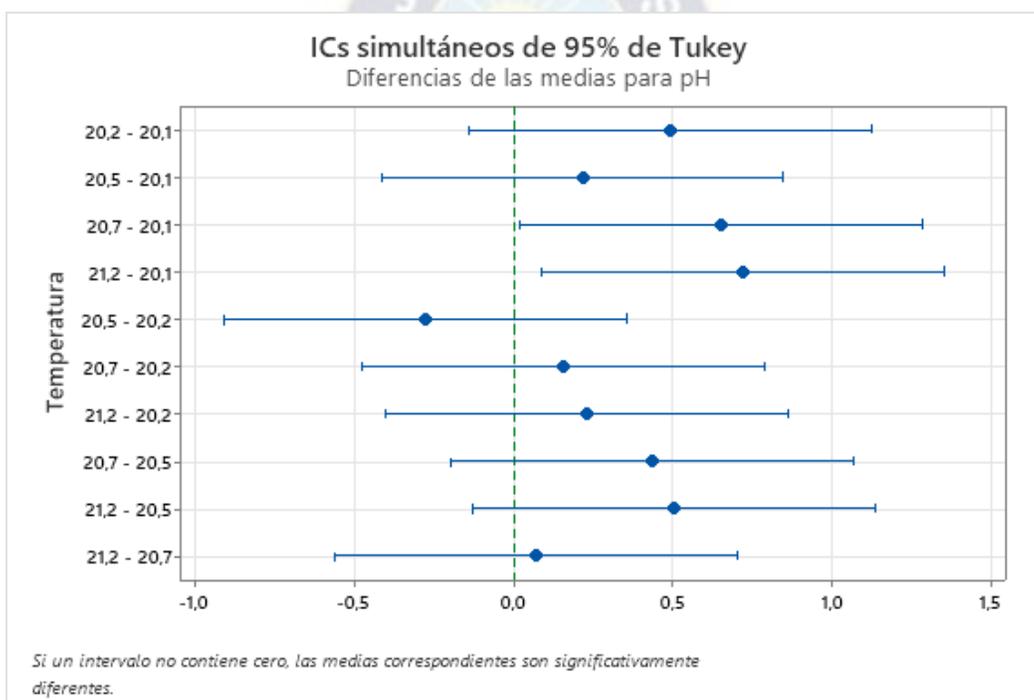
$$F_{calc} > F_{crítico}$$

Nos indica que tanto, la adición de CO₂ y la variación de temperatura afectan en el valor de pH del proceso de neutralización.

Con ambas aseveraciones se concluyó que, existe evidencia suficiente para no aceptar la H₀, es decir, que los valores de pH medidos por la temperatura y la adición de CO₂ al agua residual no son iguales y al menos una media de pH sobre la temperatura o adición de CO₂ es diferente; por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula (H₀) y se acepta la hipótesis alterna (H_A).

Gráfica 4

Comparación de Tukey: Diferencias de las medias para pH según la temperatura



Nota. Gráfica obtenida mediante el programa MiniTab usado para análisis estadístico de datos,, la cual nos muestra la comparación de Tukey

La **Gráfica 4** nos muestra que los valores de pH según el factor temperatura entre las mediciones a 20.1 y 21.2°C son significativamente diferentes, por lo tanto, la prueba realizada a 21.2°C se aleja de las demás medias; concluyendo de esta manera que, las temperaturas de trabajo entre el intervalo de 20.1 y 20.7 son óptimas para nuestro método y excluimos el valor de 21.2°C.

CAPITULO 8

8. Determinación de la cantidad de CO₂ necesario para la neutralización de 1 m³ de agua residual alcalina

Al tener un pH que oscila entre 10.5 y 12.10 de las aguas residuales alcalinas, podríamos asumir como promedio un valor de pH de 11.49 según el análisis fisicoquímico realizado a una muestra compuesta en un laboratorio certificado (ANEXO B), en el capítulo 7 desarrollamos el proceso para obtener las cantidades demandadas de CO₂ dentro del intervalo de mayor solubilidad de este gas en el agua residual alcalina para su neutralización.

Los datos obtenidos teórica y experimentalmente reflejan mayor solubilidad del gas a temperaturas más bajas, en este caso, cercanas a 20°C y se demostró en el anterior capítulo mediante análisis experimental realizado mediante el programa Excel y Minitab a los datos obtenidos en el proceso de neutralización del agua residual alcalina de industrias ALBUS S.A. que, el rango de temperatura adecuado se encuentra en el intervalo de 20,1°C y 20,9°C.

A continuación, se muestran las tablas con los datos de requerimiento en masa de CO₂ a diferentes temperaturas y mostrándonos las eficiencias en cada uno.

Tabla 33

Eficiencias de Absorción de CO₂, primera fase de pruebas

T (°C)	35,2	28,7	28,2	25,5	25,6	23	20,1
CO ₂ teórico (g)	115,11	133,31	135,08	144,61	144,25	155,04	167,62
CO ₂ experimental (g)	936	825	825	674	645	454	236
Exceso (g)	820,89	691,69	689,92	529,39	500,75	298,96	68,38
Eficiencia (%)	12,30	16,16	16,37	21,45	22,36	34,15	71,03

Nota. La tabla detalla la eficiencia de absorción de CO₂, comparando el valor teórico obtenido respecto al consumo real que se tuvo en cada prueba.

Tabla 34

Eficiencias de Absorción de CO₂, segunda fase de pruebas

T (°C)	23,5	22	21,2	20,7	20,5	20,5	20,2
CO ₂ teórico (g)	152,88	159,38	162,85	165,02	165,89	165,89	167,19
CO ₂ experimental (g)	473	347	244	248	240	253	239
Exceso (g)	320,12	187,62	81,15	82,98	74,11	87,11	71,81
Eficiencia (%)	32,32	45,93	66,74	66,54	69,12	65,57	69,95

Nota. La tabla detalla la eficiencia de absorción de CO₂, comparando el valor teórico obtenido respecto al consumo real que se tuvo en cada prueba.

Según los datos obtenidos de Eficiencia de Absorción de CO₂ en ambas etapas se aprecia que, se tiene un mayor porcentaje a temperaturas más bajas.

Por lo tanto, la **Tabla 35** nos muestra las masas de CO₂ obtenidas experimentalmente en el proceso de neutralización de 150 litros de agua residual, dentro del intervalo de los 20°C (justificado en el anterior capítulo debido a que presenta una mayor solubilidad en el agua residual).

Tabla 35

Valor promedio de uso de CO₂ para la neutralización de 150 litros de agua residual

Para 150 litros de agua residual	P1	P2	P3	P4	P5	PROMEDIO
T (°C)	20,1	20,7	20,5	20,5	20,2	
m (añad CO ₂) (g)	236	248	240	253	239	243,2

Nota. La tabla detalla la masa promedio que se consume de CO₂ en el intervalo de 20°C que, según el análisis estadístico, son los más efectivos para una variación adecuada del pH en relación a la masa de gas añadida.

Se obtuvo el valor promedio de la masa de CO₂ añadida para proceder al cálculo de la cantidad demandada de este gas para lograr la neutralización de 1 m³ de agua residual alcalina, por lo tanto, realizamos el siguiente factor de conversión:

$$1 \text{ m}^3_{\text{agua residual}} * \frac{1000 \text{ l}_{\text{agua residual}}}{1 \text{ m}^3_{\text{agua residual}}} * \frac{243.2 \text{ gCO}_2}{150 \text{ l}_{\text{agua residual}}} = 1621.33 \text{ gCO}_2 = 1.621 \text{ kgCO}_2$$

Realizado el factor de conversión con el promedio en masa de CO₂ empleado para la neutralización de 150 litros de agua residual, se obtuvo que:

Son necesarios 1.621 kg de CO₂ para la neutralización de 1 m³ de agua residual, este valor será necesario para realizar un análisis de costos al proceso, el cual se desarrolla en los siguientes capítulos.



CAPITULO 9

9. Determinación de la cantidad de coagulante usado actualmente y después del proceso de neutralización con CO₂

9.1. Clarificación del agua

La clarificación del agua tiene por objeto retirar los sólidos suspendidos, sólidos finamente divididos y materiales coloidales, convirtiéndolos en partículas más grandes que se pueden remover con mayor facilidad. Es un proceso utilizado tanto en sistemas de tratamiento de aguas municipales con el fin de obtener agua potable para consumo humano, como en sistemas de tratamiento de aguas industriales que comprenden el tratamiento individual del agua proveniente de acueductos municipales de acuerdo con su uso final, ya sea agua para elaboración de bebidas o alimentos, generación de vapor o circuitos de refrigeración, lavado de envases, etc.

La clarificación incluye los subprocesos de coagulación, floculación y sedimentación.

9.1.1. Coagulación

Proceso de formación de pequeñas partículas gelatinosas mediante la adición de un coagulante al agua y la aplicación de energía de mezclado, que desestabiliza las partículas suspendidas por neutralización de las cargas de coloides cargados negativamente. Comienza en el mismo instante en que se agrega el coagulante y dura solo fracciones de segundo. Desde el punto de vista electrostático, el propósito de la coagulación es reducir el potencial zeta por adición de iones específicos e inducir la desestabilización de las partículas para aglomerarlas.

La coagulación es el tratamiento más eficaz para la eliminación de impurezas en el agua y también puede representar un gasto elevado cuando no se realiza adecuadamente.

La dosis de coagulante condiciona el funcionamiento de las unidades de sedimentación y es imposible realizar una buena clarificación si la cantidad de coagulante no es la adecuada.

9.1.2. Floculación

Proceso mediante el cual se juntan las partículas desestabilizadas o coaguladas para formar un aglomerado más grande llamado flóculo y se debe a un mecanismo de formación de puentes químicos o enlaces físicos. Operativamente, la floculación se consigue recurriendo a una mezcla moderada y prolongada que transforma las partículas coaguladas de tamaño submicroscópico en otras suspendidas, discretas y visibles.

9.1.3. Sedimentación

Es la remoción de partículas más pesadas que el agua por acción de la fuerza de gravedad. Mediante este proceso se eliminan materiales en suspensión empleando un tiempo de retención adecuado. Estos sólidos están constituidos generalmente por arenas, limos y coloides agrupados mediante las etapas anteriores de coagulación y floculación.

En las plantas de tratamiento estos tres procesos, descritos anteriormente, tienen lugar en un mismo equipo denominado clarificador. (Cogollo Flores, 2011, pág. 6)

9.1.4. Coagulante Sulfato férrico

El Sulfato Férrico es un coagulante empleado en el tratamiento de agua para consumo humano, aguas residuales y agua para riego tecnificado en la agroindustria.

En las operaciones de tratamiento de agua y aguas residuales, se utiliza como coagulante o floculante para la clarificación del agua, el control del olor para minimizar la liberación de sulfuro de hidrógeno, para la eliminación de fósforo, y como un espesamiento de lodos, acondicionado y agente de deshidratación.

En la industria minera se emplea para remover metales pesados del agua del proceso de extracción de material.

En el tratamiento de agua para consumo humano se emplea para remover limos además de metales, arsénico y otros contaminantes no metálicos.

En la industria pesquera se emplea para recuperar sólidos, aceites y grasa del agua de bombeo. (Córdor G., 2021, pág. 8)

9.2. Metodología del procedimiento de coagulación y floculación

Figura 20

Diagrama de Procesos detallando la metodología de clarificación



NOTA: Diagrama referencial al test de jarras

9.3. Dosificación de coagulante al agua residual neutralizada

Un pH óptimo para la remoción de turbiedad y la mejor desestabilización de partículas coloidales, permitiendo la formación de flóculos pesados y compactos oscila entre 6 y 7.

Por lo tanto, después de haber neutralizado las muestras de agua residual alcalina, se realizaron las pruebas para la adición de coagulante. Se partió de los ensayos que tuvieron menor consumo de CO₂ para su neutralización.

Se realizaron ensayos para la dosificación adecuada de coagulante a cada muestra, manteniendo los siguientes valores constantes:

- Volumen de cada muestra de agua neutralizada: 100 ml
- Volumen de floculante: 2.8 ml

Tabla 36

Adición de Coagulante para pH 7.12

pH = 7.12			
V_{coag} añad (ml)	0.6	0.8	1
Observaciones	Poca formación de coágulos	Mayor formación de coágulos	Formación de flocs

Nota. Se añadieron diferentes cantidades de coagulante a una muestra de 100 ml, se observó un mejor resultado en cuanto a la formación de coágulos y posterior formación de flocs al haber añadido 1 ml de coagulante.

Tabla 37

Adición de Coagulante para pH 6.87

pH = 6.87			
V_{coag} añad (ml)	0.5	0.7	0.9
Observaciones	Poca formación de coágulos	Poca formación de coágulos	Formación de flocs

Nota. Se añadieron diferentes cantidades de coagulante a una muestra de 100 ml, se observó un mejor resultado en cuanto a la formación de coágulos y posterior formación de flocs al haber añadido 0.9 ml de coagulante.

Tabla 38

Adición de Coagulante para pH 6.74

pH = 6.74			
V_{coag} añad (ml)	0.5	0.7	0.9
Observaciones	Poca formación de coágulos	Poca formación de coágulos	Formación de flocs

Nota. Se añadieron diferentes cantidades de coagulante a una muestra de 100 ml, se observó un mejor resultado en cuanto a la formación de coágulos y posterior formación de flocs al haber añadido 0.9 ml de coagulante.

Tabla 39

Adición de Coagulante para pH 6.72

pH = 6.72			
V_{coag} añad (ml)	0.5	0.7	0.9
Observaciones	Poca formación de coágulos	Poca formación de coágulos	Formación de flocs

Nota. Se añadió diferentes cantidades de coagulante a una muestra de 100 ml, se observó un mejor resultado en cuanto a la formación de coágulos y posterior formación de flocs al haber añadido 0.9 ml de coagulante.

Tabla 40

Adición de Coagulante para pH 6.69

pH = 6.69			
V_{coag} añad (ml)	0.5	0.7	0.9
Observaciones	Poca formación de coágulos	Mayor formación de coágulos	Formación de flocs

Nota. Se añadió diferentes cantidades de coagulante a una muestra de 100 ml, se observó un mejor resultado en cuanto a la formación de coágulos y posterior formación de flocs al haber añadido 0.9 ml de coagulante.

Analizando las tablas 34 a la 38 se observa que, el consumo de coagulante promedio es de **1 ml por cada 100 ml de agua residual neutralizada**; se usaron cantidades volumétricas para su dosificación debido a que el coagulante se adquiere del distribuidor en una solución concentrada, la cual es diluida 5 veces su volumen para ser usado como coagulante

9.4. Análisis de Laboratorio de Sólidos Suspendedos del agua neutralizada con adición de coagulante y floculante

Realizada la neutralización de agua residual, se procedió a la adición de coagulante y floculante a las muestras de agua residual; el agua clarificada fue llevada para análisis de sólidos suspendidos totales a un laboratorio certificado para corroborar la eficacia de la dosificación de coagulante empleado, obteniendo el siguiente resultado.

Tabla 41

Análisis de Sólidos Suspendidos Totales del agua neutralizada y tratada

Parámetro	Unidades	Valor máximo aceptable*	Resultados
Sólidos Suspendidos Totales	mg/l	60	5

Nota. Análisis de Laboratorio realizado en el Laboratorio certificado CIALAB

Se observa por el análisis realizado que, el agua clarificada se encuentra por debajo del valor máximo aceptable en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica de la Ley 1333; por lo tanto, se comprueba una eficaz remoción de sólidos suspendidos con la cantidad de coagulante añadido.

9.5. Determinación de la cantidad de coagulante usado antes y después de la neutralización con CO₂

9.5.1. Cantidad de coagulante usado actualmente

Se realizó un balance en la planta de tratamiento de aguas residuales, referente a las cantidades dosificadas de coagulante, floculante y agua residual; como ya se había anticipado, el pH de las mismas oscila en un intervalo reducido, pudiéndose considerar valores constantes de estas cantidades dosificadas.

Tabla 42

Volúmenes de Alimentación a la PTAR

Agua Residual (ml/s)	Coagulante (ml/s)	Floculante (ml/s)
314,15	10.83	8,9

Nota. Datos obtenidos del Balance de materia en la planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Plan de Manejo

Ambiental, Industrias ALBUS S.A.

Teniendo los valores, se efectuó un factor de conversión para la cantidad de coagulante dosificado por cada 100 ml de agua residual:

$$100 \text{ ml}_{\text{agua residual}} * \frac{10.83 \text{ ml}_{\text{coagulante}}}{314.15 \text{ ml}_{\text{agua residual}}} = 3.45 \text{ ml}_{\text{coagulante}}$$

9.5.2. Cantidad de coagulante empleado después del proceso de neutralización

En las Tablas 36 a la 40 se detallaron pruebas de dosificación de coagulante a valores de pH muy próximos al neutro, de las cuales se tomó el volumen más elevado, el cual no difiere mucho respecto a los otros:

Tabla 43

Volumen de coagulante empleado después del proceso de Neutralización respecto a 100 ml de agua residual

Agua Residual (ml)	Coagulante (ml)	Floculante (ml)
100	1	2.8

Nota. La tabla detalla el volumen de coagulante y floculante usados para el tratamiento de clarificación de 100 ml de agua residual neutralizada.

9.5.3. Agua Residual alcalina generada en INDUSTRIAS ALBUS S.A.

Diariamente se generan aproximadamente 5.8 m³ de agua residual, provenientes de los procesos de descrude y blanqueo de algodón, gasas y/o vendas; la planta de tratamiento opera 5 días semanalmente, mensualmente 22 días y se tienen 12 meses al año, por lo tanto:

Tabla 44

Agua residual generada en (m³)

Agua Residual generada (m ³)			
Diaria	Semanal	Mensual	Anual
5.80	29.00	127.60	1531.20

Nota. Datos obtenidos del Balance de materia en la planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Plan de Manejo

Ambiental, Industrias ALBUS S.A.

9.5.4. Resumen de la cantidad de Coagulante empleado en ambos procesos

La demanda diaria de coagulante según el Balance de materia en la planta de Tratamiento de Aguas Residuales del Plan de Manejo Ambiental, Industrias ALBUS S.A. es de 200 litros diarios.

Obtenidos los datos del agua residual generada por lapsos de tiempo, y realizadas las pruebas para la adición de coagulante, se obtuvo la siguiente tabla resumen, expresada en litros de coagulante requeridos antes y después de aplicar el proceso de neutralización en el agua residual.

Tabla 45

Volumen de Coagulante requerido antes y después del proceso de neutralización

	Diario (l)	Semanal (l)	Mensual (l)	Anual (l)
Antes del Proceso	200	1000	4400	52800
Después del Proceso	58	290	1276	15312

Nota. La tabla detalla la disminución del uso de coagulante, en el proceso actual de tratamiento de la empresa respecto al volumen de este usado en el agua residual neutralizada.

9.5.5. Porcentaje de coagulante reducido por el proceso de neutralización

Se calculó el porcentaje de coagulante que se redujo gracias al proceso de neutralización; con los datos obtenidos de la **Tabla 43**:

$$\%_{Red} = 100 - \frac{58}{200} * 100 = 71.20\%$$

Este valor nos muestra que la cantidad demandada de coagulante disminuyó considerablemente para realizar el proceso de clarificación del agua residual, solo el 28,8% del volumen habitual es empleado si se lleva a cabo el proceso de neutralización.

CAPITULO 10

10. Análisis de Costos

10.1. Pronóstico de costos de CO₂ y Coagulante para el proceso de Neutralización

10.1.1. Demanda en volumen de CO₂ y coagulante respecto al requerimiento del agua residual

En base a los datos obtenidos en los anteriores puntos, se realizó un resumen promedio de requerimientos en masa de CO₂ y volumen de coagulante empleado:

Tabla 46

Promedio de masa de CO₂ y coagulante demandados aplicando el proceso de Neutralización por lapsos de tiempo

	Diaria	Semanal	Mensual	Anual
Agua residual (m ³)	5,8	29	127,6	1531,2
CO ₂ (kg)	9,40	47,01	206,84	2482,08
Coagulante (l)	58	290	1276	15312

Nota. La tabla detalla las cantidades necesarias de CO₂ y coagulante empleadas para la neutralización y coagulación de agua residual alcalina en intervalos de tiempo diario, semanal, mensual y anual.

10.1.2. Pronóstico de Costos del CO₂ y Coagulante para el proceso de Neutralización

Los precios de los insumos utilizados en el proceso de neutralización y clarificación del agua residual:

- 1 kg de CO₂: 20 Bs
- 40 litros de coagulante: 14.9 Bs
- 200 litros de floculante: 8.9 Bs

En base a la **Tabla 46** y los precios, tanto del CO₂ y coagulante se obtuvieron los siguientes costos:

Tabla 47

Costos de los Insumos para el proceso de Neutralización

	Diario	Semanal	Mensual	Anual
CO ₂ (Bs)	188,04	940,18	4136,79	49641,50
Coagulante (Bs)	21,61	108,03	475,31	5703,72
Floculante (Bs)	11,49	57,43	252,68	3032,16
Total (Bs)	221,13	1105,63	4864,78	58377,38

Nota. La tabla detalla los costos de CO₂, coagulante y floculante necesarios para la neutralización y clarificación del agua residual alcalina.

10.1.3. Costos respecto a la cantidad de coagulante y floculante usados actualmente

En base a la generación promedio de aguas residuales, la cantidad de coagulante necesario y el costo del mismo, se elaboró la siguiente tabla:

Esta nos detalla los costos actuales en la empresa respecto a la cantidad de coagulante y floculante empleados.

Tabla 48

Costo del proceso de clarificación empleado actualmente en INDUSTRIAS ALBUS S.A.

	Diario	Semanal	Mensual	Anual
Coagulante (Bs)	74,5	372,5	1639	19668
Floculante (Bs)	11,49	57,43	252,68	3032,16
Total (Bs)	85,99	429,93	1891,68	22700,16
Costo total (Bs/m3)	14,83	74,13	326,15	3913,82

Nota. La tabla detalla los costos actuales en el tratamiento convencional de clarificación de la empresa, solo considerando el coagulante y floculante.

10.2. Costos Fijos

Para calcular los costos fijos se tomaron en cuenta los que empleamos para la construcción del burbujeador, respecto a algunas conexiones de tubería, el agitador, la balanza y el motor, se utilizaron equipos que ya se tenían en la empresa, reduciendo de esta manera este punto.

Respecto a la mano de obra, se contó con el apoyo del área de Mantenimiento para determinadas acciones necesarias, como ser, la conexión del agitador.

Tabla 49

Costos Fijos

	Cantidad	Costo (Bs)
Tubería 1/2 plg	2 metros	16
Codos 1/2 plg	2	8
Unión universal	2	8
Cinta teflón	1	4
Total (Bs)		36

Nota. La tabla detalla los costos fijos que se presentaron para la elaboración del equipo de neutralización, los mismos, no fueron elevados debido a la reutilización de piezas y equipos con los que cuenta la empresa.

10.3. Costos Variables

Se tomaron en cuenta como variables, las cantidades de CO₂, coagulante y energía eléctrica.

- El motor tiene una potencia de 0.45 HP
- El costo de energía eléctrica es de 1 Bs = 0.7 kW-h
- El tiempo de operación de nuestro motor 4 h.

Según los datos anteriores tendremos el siguiente factor de conversión para el consumo de energía eléctrica, es decir, el costo por hora de energía eléctrica:

$$0.45 \text{ HP} * \frac{0.746 \text{ kW}}{1 \text{ HP}} * 4 \text{ h} = 1.343 \text{ kW} - \text{h}$$

$$1.343 \text{ kW} - \text{h} * \frac{1 \text{ Bs}}{0.7 \text{ kW} - \text{h}} = 1.92 \text{ Bs}$$

Por lo tanto, a partir de estos valores, se construyó una nueva tabla, añadiendo el costo de la Energía eléctrica a la **Tabla 46**.

Tabla 50

Costos Variables

	Diario	Semanal	Mensual	Anual
CO ₂ (Bs)	188,04	940,18	4.136,79	49.641,50
Coagulante (Bs)	21,61	108,03	475,31	5.703,72
Energía Eléctrica (Bs)	1,92	9,6	42,24	506,88
Floculante (Bs)	11,49	57,45	252,78	3.033,36
Total (Bs)	223,05	1.115,26	4907,12	5.8885,46
Costo total (Bs/m³)	38,46	192,29	846,06	10152,67

Nota: La tabla detalla los costos variables presentes en el proceso de neutralización, la energía eléctrica proviene del uso del motor del agitador.

Respecto a los costos fijos, no tuvimos mucho inconveniente, debido a que se emplearon materiales con los que ya se contaba en la empresa; sin embargo, en los costos variables, si bien, se disminuyó el uso de coagulante en un 71.2%, este se encuentra por encima de los costos variables actuales del proceso de clarificación del agua residual.

10.4. Análisis de Costos

Para determinar los valores de: Costo total, gastos generales, utilidad e impuestos a las transacciones se partirá de los cálculos de Insumos, Mano de obra y Herramientas y equipos, finalmente se obtendrá el Costo total de precio unitario para aplicación de nuestro sistema.

Las fórmulas a emplear:

10.4.1. Costo Total (D)

Abarcará la suma de Insumos, mano de obra y herramientas y equipo.

$$D = TOTAL = A + B + C$$

Donde:

A = Costo de los insumos

B = Costo de Mano de obra

C = Costo de herramientas y equipo

10.4.2. Gastos Generales (E)

Implica el 20% del Costo total.

$$E = GASTOS GENERALES = 0.2 * D$$

Donde:

D = Costo total

10.4.3. Utilidad (F)

Representa el 15% del costo total.

$$F = UTILIDAD = 0.15 * D$$

Donde:

D = Costo total

10.4.4. Impuestos a las transacciones (G)

Representan el 3% del costo total.

$$G = IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES = 0.03 * D$$

Donde:

D = Costo total

10.4.5. Costo total de precio unitario para aplicación

Abarca la sumatoria del Costo total, gastos generales, utilidad e impuestos a las transacciones se partirá de los cálculos de Insumos, Mano de obra y Herramientas y equipos.

$$COSTO\ TOTAL = D + E + F + G$$

Donde:

D = Costo Total

E = Gastos Generales

F = Utilidad

G = Impuestos a las transacciones

10.4.6. Insumos (A)

Para un lapso mensual de tiempo, los insumos necesarios serán:

Tabla 51

Precio de Insumos

Ítem	Precio Diario	Cantidad	Precio Total
CO ₂	188,04	22	4136,79
Coagulante	21,61	22	475,31
Energía Eléctrica	1,92	22	42,24
Floculante	11,49	22	252,78
Total (Bs)	223,05		4907,12

Nota. La tabla detalla el precio de los insumos necesarios en los procesos de neutralización y clarificación del agua residual.

10.4.7. Mano de Obra (B)

Los precios detallados a continuación, reflejan el salario mensual del operador de la planta de aguas residuales y de un obrero de mantenimiento

Tabla 52

Precio de mano de obra

Ítem	Descripción	Precio Total
Salario operario	Un mes de sueldo	3500
Salario técnico mantenimiento	Un mes de sueldo	3200
Total (Bs)		6700

Nota. La tabla detalla el precio de los operadores que intervienen en la planta de tratamiento de aguas residuales.

10.4.8. Herramientas y Equipo (C)

Los precios detallados a continuación, son de los materiales que se compraron para realizar la construcción del equipo, los demás fueron provistos del almacén de la empresa, o de equipos en desuso.

Tabla 53

Precio de las herramientas y equipos

Ítem	Cantidad	Precio Unitario (Bs)	Precio Total (Bs)
Tubería 1/2 plg	2 metros	8	16
Codos 1/2 plg	2	4	8
Unión universal	2	4	8
Cinta teflón	1	4	4
Total (Bs)			36

Nota. La tabla detalla el precio de las herramientas necesarias para la construcción del equipo.

10.4.9. Cálculos

Ya elaboradas las tablas, se realizaron los cálculos de D, E, F, G y costo total

$$D = \text{TOTAL} = A + B + C = 4907.12 + 6700 + 36 = 11\,643.12(\text{Bs})$$

$$E = \text{GASTOS GENERALES} = 0.2 * D = 0.2 * 11643.12(\text{Bs}) = 2328.624 (\text{Bs})$$

$$F = \text{UTILIDAD} = 0.15 * D = 0.15 * 11643.12(\text{Bs}) = 1\,746.468 (\text{Bs})$$

$$G = \text{IMPUESTOS A LAS TRANSACCIONES} = 0.03 * D = 0.03 * 11643.12(\text{Bs}) \\ = 349.294 (\text{Bs})$$

$$\text{COSTO TOTAL} = D + E + F + G = 16\,067.506 (\text{Bs})$$



CAPITULO 11

11. Conclusiones y Recomendaciones

11.1. Conclusiones

- Se realizó la caracterización de las aguas residuales de la empresa, se midió el pH de las mismas y el proceso del cual provenían, se determinó que estas se encuentran en el rango de 10.5 a 12.10, lo cual nos ayudó a manejar un valor promedio para las dosificaciones de CO₂ y coagulante.
- Una vez realizada la caracterización, se empezaron a hacer pruebas de dosificación de CO₂ al agua residual a distintas temperaturas y se comprobó una disminución de pH en las mismas, sin embargo, se examinó que a menor temperatura se tenía una mejor disolución del gas en el medio acuoso residual, comprobando la teoría que, se disuelve mayor cantidad de CO₂ gaseoso a menores temperaturas.
- Se propuso un equipo adecuado según bibliografía para obtener una mayor disolución del CO₂ en el agua residual, se detallaron las características del mismo, como ser, las partes que lo componen y sus dimensiones, también se propuso el elemento ideal para la dispersión del CO₂ proveniente del botellón de gas.
- Se armó el equipo, sin embargo, al tener limitantes respecto al material del tanque, el agitador y el motor en su funcionamiento mantenía constantes las revoluciones de giro, los mismos, dispuestos por la empresa para las pruebas a escala planta piloto.

- Se procedió a readecuar algunas características que se habían propuesto, se operó con una altura de líquido similar a la del diámetro interno del tanque y también se dispuso el agitador alejado del centro geométrico de este, para evitar la formación de vórtices en el líquido y así poder dejar de lado el colocado de baffles,; aun así, se obtuvieron buenos resultados respecto a la dispersión del CO₂ debido a que el agitador en forma de hélice instalado es útil para líquidos poco viscosos como el agua residual.
- Se establecieron condiciones óptimas de operación para una mejor dispersión del gas en el agua residual, una de ellas, la altura de llenado del equipo, similar a la del diámetro del mismo; la temperatura de dosificación que, en nuestro caso llegó a un mínimo de 20.1°C demostrando una eficiencia de absorción del gas en el líquido del 71%, valor que se obtuvo comparando el CO₂ suministrado en la prueba respecto al valor teórico calculado con el agua mediante la ley de Henry, el cual nos sirvió de base para este apartado. Aplicado el análisis estadístico de datos para las pruebas que presentaron una menor demanda de CO₂ se concluyó que, dentro del intervalo de 20°C tenemos una temperatura apropiada para conseguir una rápida disminución del pH con una dosificación mínima de masa de gas.
- Con el análisis estadístico respectivo, se concluyó que los datos de dosificación aplicados dentro del rango de 20°C eran los ideales por tener un menor consumo de masa de CO₂ y, por lo tanto, con los mismos se realizó un promedio de masa de gas empleado para la neutralización de determinado volumen, este valor se usó para obtener que, 1 m³ de agua residual alcalina requiere 1.621 kg de CO₂ para ser neutralizada.

- Para la formación de flóculos pesados y compactos se requiere un pH entre 6.5 y 7, en la empresa actualmente se usan 200 litros de coagulante diarios aproximadamente para el tratamiento 5.8 m³ de agua residual generada y con el tratamiento de neutralización se redujo en un 71.2% esta cantidad, llegando a 58 litros diarios de coagulante junto a los 9.4 kg de CO₂.
- Realizados los costos fijos y variables; se obtuvieron costos fijos de solamente 36 Bs debido a que se usaron equipos y materiales con los que ya se contaba en la empresa; sin embargo, aunque se logró disminuir el uso de coagulante del proceso en un 71.2%, realizado el total de los costos variables, se obtuvo que, aplicando el proceso de neutralización con adición de CO₂ estos se incrementan en un 259,39% respecto al costo que representan actualmente. Concluyendo de esta manera, que la metodología no representa una alternativa económica viable.

11.2. Recomendaciones

- ❖ Con el método convencional de enfriamiento que se tiene en la empresa, solo se consiguió disminuir la temperatura a 20°C como máximo, se recomienda implementar alguna metodología que permita disminuir aún más este valor e implementar un equipo igual al propuesto en el presente trabajo, para así lograr una mayor disolución de CO₂ y realizar una reevaluación de costos del proceso.
- ❖ La búsqueda de otro proveedor de CO₂ gaseoso que, pueda negociar un precio más bajo de este gas, para hacer más viable económicamente el proceso de neutralización.

12. Bibliografía

- de Freitas, K. (2002). *Caracterización y Reuso de Efluentes del Proceso de Beneficio de la Industria Textil*. Florianópolis.
- Aguilar, M., Sáez, J., Lloréns, M., Soler, A., & Ortuño, J. (2002). *Tratamiento físico-químico de aguas residuales*. Murcia: F. G. GRAF S.L.
- Belzona Inc. (2010). *Tratamiento de aguas residuales* (Primera Edición ed., Vol. Primera Edición). (A. Troconis, Ed.) Miami, Florida, USA: BELZONA.
- Bolivar, G. (18 de Noviembre de 2021). *Lifeder*.
- Cogollo Flores, J. M. (2011). Clarificación de aguas usando coagulantes polimerizados: caso del hidroxiclورو de aluminio.
- Cóndor G., E. (10 de 09 de 2021). Especificación Técnica. *Sulfato Férrico en solución*.
- Da Camara, L., Hernández, M., & Paz, L. (2018). *MANUAL DE DISEÑO PARA PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS*.
- Derksen, J., Doelman, M., & Van den , A. (1999). Three Dimensional LDA measurements in the impeller region of a turbulently stirred tank.
- Doménech, X., & Peral , J. (2006). *Química ambiental de sistemas terrestres*. Reverté.
- Gutierrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. México D.F.: McGraw Hill.
- (2019). *Industrias Albus S.A*. La Paz.
- Manahan, S. (2007). *Introducción a la Química Ambiental*. Barcelona: Reverté.

McCabe, & Smith. (1968). *Operaciones Básicas de Ingeniería Química*. Barcelona: Reverté.

Pinto, K. (2009). *Tratamiento de Efluentes Industriales y Domésticos*. Campinas: Sao Paulo.

(s.f.). *Reglamento de la Ley de Medio Ambiente, Anexo-2*.

The Linde Group. (s.f.). *Consejo de Seguridad -12 Trabajando con Dióxido de Carbono*.

Treybal, R. E. (1997). *Operaciones de Transferencia de Masa*. McGraw-Hill.

13. Anexos

Anexo A – Informe de Análisis de Agua UMSA



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN Y
DESARROLLO DE PROCESOS QUÍMICOS
IIDEPROQ



Nº IIDEPROQ 01-12-11-156

INFORME ANÁLISISAGUA

Cliente	Industrias ALBUS
Responsable Muestreo	Ing. Juan Carlos Mendez
Fecha de muestreo	25 de Noviembre de 2011
Fecha de recepción muestra	1° de Diciembre de 2011
Atención	Ing. Juan Carlos Mendez
Fecha emisión Informe	1° de Diciembre de 2011

RESULTADOS

A) AGUA

Muestra	Agua
Procedencia de la muestra	Descarga industrial – Salida al río Choqueyapu

PARÁMETRO	VALOR	UNIDAD	MÉTODO ANÁLISIS
pH	10.5		Potenciométrico

Tec. Sup. María de la Cruz Roca
ANALISTA

Ing. Virginia Rojas M.
DIRECTORA a.i. IIDEPROQ



Página 1 de 1

Anexo B – Informe de Análisis de Agua EPSAS



pag. 1 de 1

Departamento de Control de Calidad
Laboratorio Central

LAB ISO FOR 18.02/M - 60

Informe de Análisis de Agua

Cliente: Sr. Milton Quisberth
 Empresa: Industrias ALBUS
 NIT: —
 Dirección solicitante: Av. Vásquez
 Localidad del muestreo: La Paz
 Lugar/Zona: Av. Vásquez
 Tipo de Muestra: Agua
 Fuente: Agua Residual Industrial
 Punto de muestreo: Descarga Industrial
 Código de muestra del cliente: —
 Responsable de Muestreo: Sr. Milton Quisberth
 Procedimiento de Muestreo: —
 Fecha de Muestreo: 17/05/2007
 Hora de muestreo: 17:00
 Recipiente: bidón plástico
 Volumen de muestra: 5 Litros
 Condiciones de la muestra: buenas
 Fecha de recepción laboratorio: 29/05/2007
 Fecha de análisis: 29/05/2007

Parámetro	Método	Unidades	Valor máximo aceptable *	Resultados
DBO ₅	SM - 5210 - B	mg/L	80	996,2
DQO	SM - 5220 - D	mg/L	250	4210,0
Aceites y grasas	SM - 5520 - B	mg/L	10	32,40
pH	SM - 4500 - H'B	unidades de pH	6 a 9	11,49
Conductividad	SM - 2510 - B	uS/cm	—	7810
Sólidos suspendidos totales	SM - 2540 - B	mg/L	60	1568

* Límites permisibles para Descargas Líquidas Anexo A - 2. Reglamento de la Ley del Medio Ambiente.

SM : STANDARD METHODS - Métodos analíticos normalizados APHA, AWWA, y WPCF e inciso en mayúscula que indica el método empleado

El resultado de este análisis se refiere exclusivamente a la muestra analizada.

Parámetros acreditados - NB - ISO-IEC 17025 . D.S.28243 del 14/07/05 IBMETRO con negrilla y cursiva.

Analista:

E.S.

R.L.



ING. RODOLFO GARCIA AGUILAR
 JEFE DE DEPARTAMENTO
 LABORATORIO CENTRAL
 Empresa Pública Social de Agua y Saneamiento

Anexo C – Informe de Análisis de Agua EPSAS

	INFORME DE ENSAYO			
	F01-L7.8	FE: 2022-07-08	Versión: 8	Nº: 503-2022

CLIENTE:	INDUSTRIAS ALBUS S.A.
SOLICITANTE:	Belén Chávez Aguilar
*DIRECCIÓN DEL CLIENTE:	No indica
*PROCEDENCIA DE LA MUESTRA:	Av. Pura Pura
*PUNTO DE MUESTREO:	Planta de tratamiento
RESPONSABLE DE MUESTREO:	Muestra tomada por el cliente.
*TIPO DE MUESTRA:	Muestra simple
Nº DE MUESTRAS:	Una muestra tomada en envase de plástico con capacidad de 500 mL
*FECHA DE MUESTREO:	2022-09-30
*HORA DE MUESTREO:	13h00m
FECHA DE RECEPCIÓN DEL LABORATORIO:	2022-09-30
FECHA DE INICIO DE ENSAYOS:	2022-09-30
FECHA DE EMISIÓN:	2022-10-04



RESULTADOS:

Nº	PARÁMETRO	MÉTODO	UNIDADES	RESULTADOS
1	Sólidos Suspendidos Totales	SM- 2540 D	mg/l	5

*Información proporcionada por el cliente.

REFERENCIAS:

SM STANDARD METHODS- Métodos analíticos Normalizados APHA, AWWA Y WPCF
HACH WATER ANALYSIS HANDBOOK

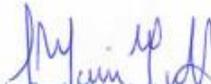
OBSERVACIONES:

Código de cotización: COT-CIALAB-263-2022

Matriz: Agua Residual

Personal encargado de la toma de muestra: Muestra tomada por el cliente.

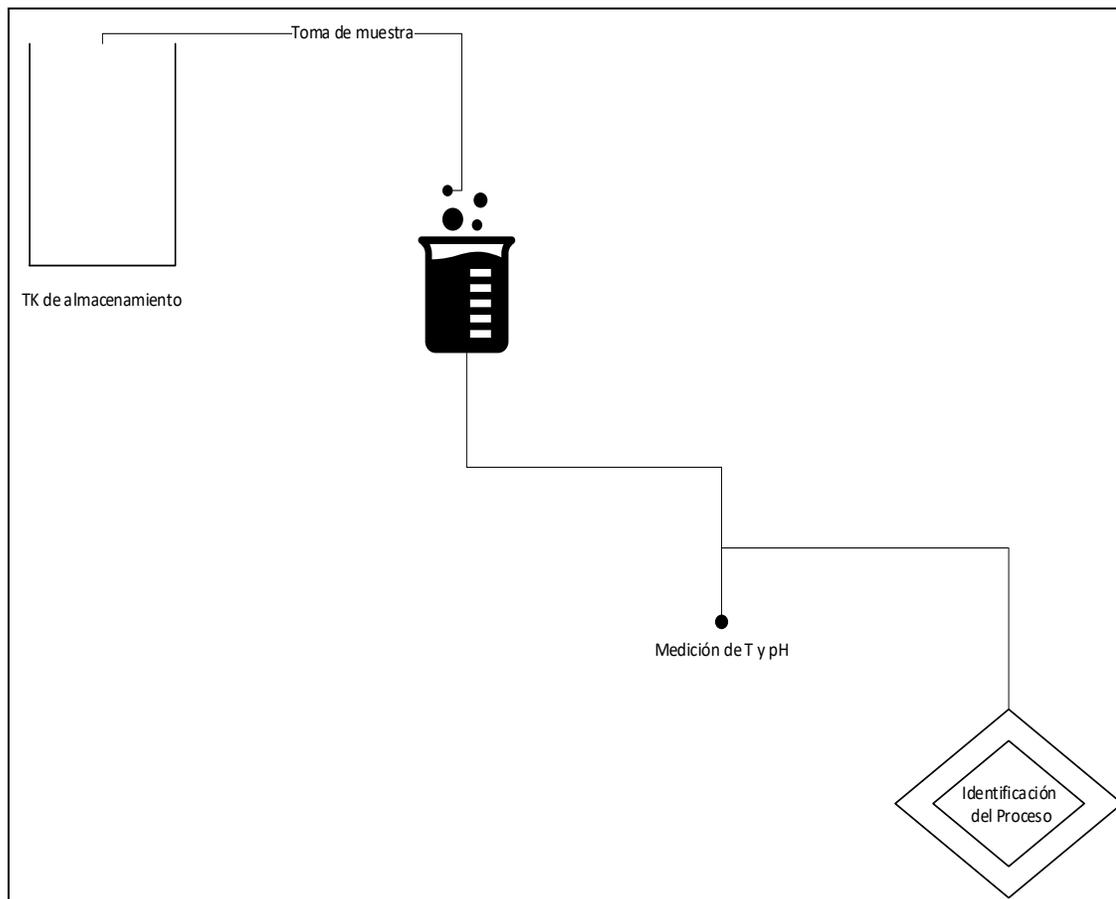
El análisis se realizó en instalaciones del laboratorio.


 Ing. Rosalva Mónica Machicao Alarcón
 GERENTE GENERAL

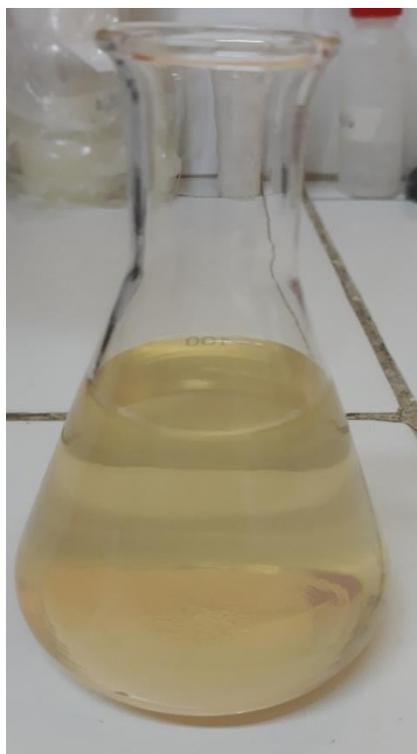
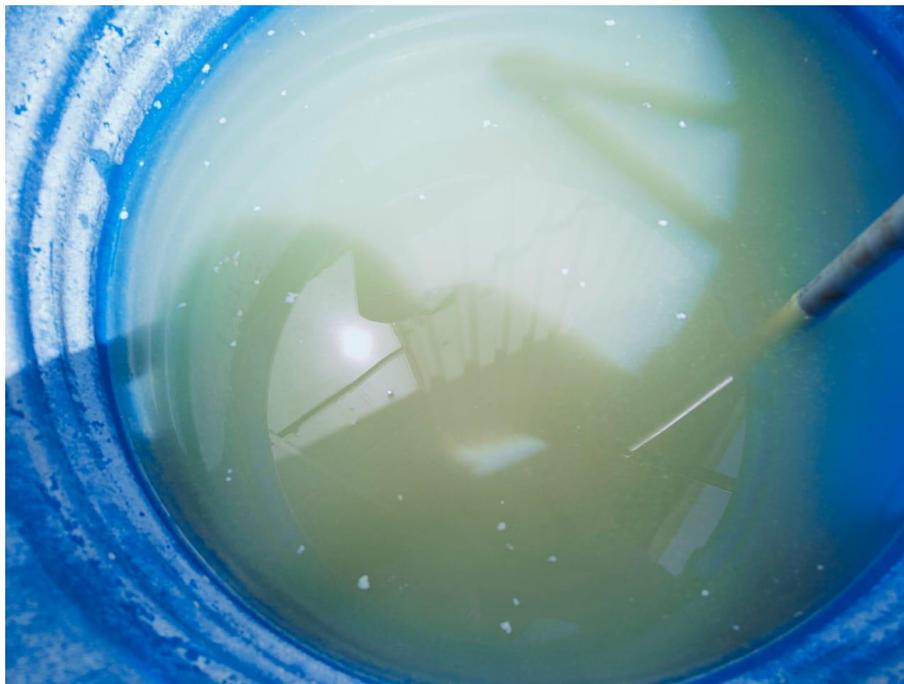

Los resultados de los ensayos presentados, se refieren exclusivamente a las muestras enviadas/ entregadas por el interesado. Los resultados NO constituyen garantía de la representatividad de la muestra del (o los) bienes y estrictamente están relacionadas con la(s) muestra(s). CIALAB no asume ninguna responsabilidad en relación con el origen o fuente extraída o por la información proporcionada por el cliente, que pueda afectar la validez de los resultados.

CIALAB reconoce únicamente como válidos, informes de ensayo emitido en soporte físico L con el debido sello y firma correspondiente.

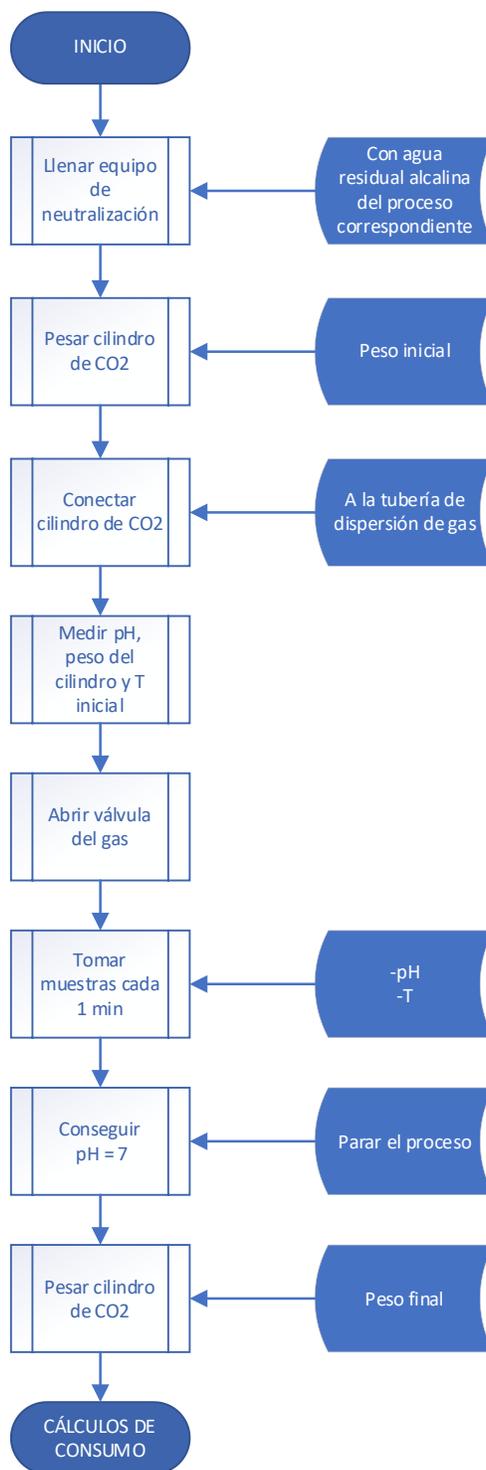
Oficina Central y Laboratorio: Calle 31-C, No 20, frente a Plaza Franz Tamayo, Zona Alpacoma, Ciudad Satélite. El Alto. **Sucursal:** Zona Miraflores Calle Claudio Sanjinés esq. República Dominicana N° 1697 Teléfonos: 2813806 - 2249108, e-mail: monicamachicao@ciabol.com, efrainbonifaz@ciabol.com, katherinemarin@ciabol.com.

ANEXO D – Diagrama de Recolección de Muestras

ANEXO E – Muestra de Agua Residual

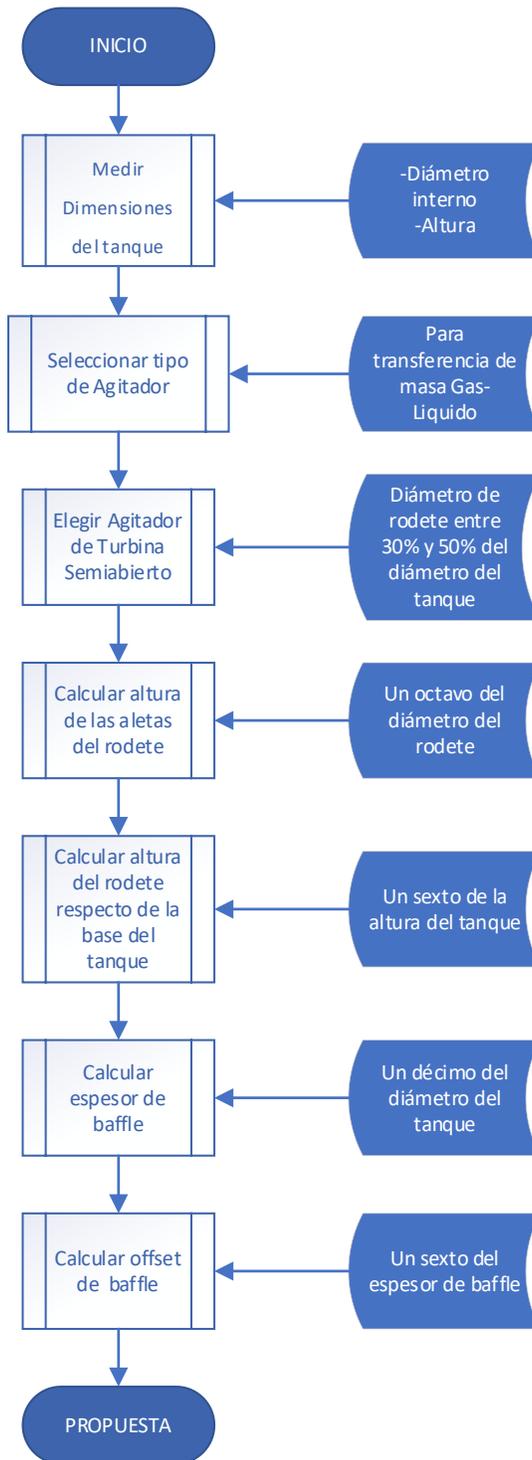


NOTA: Muestras de agua residual

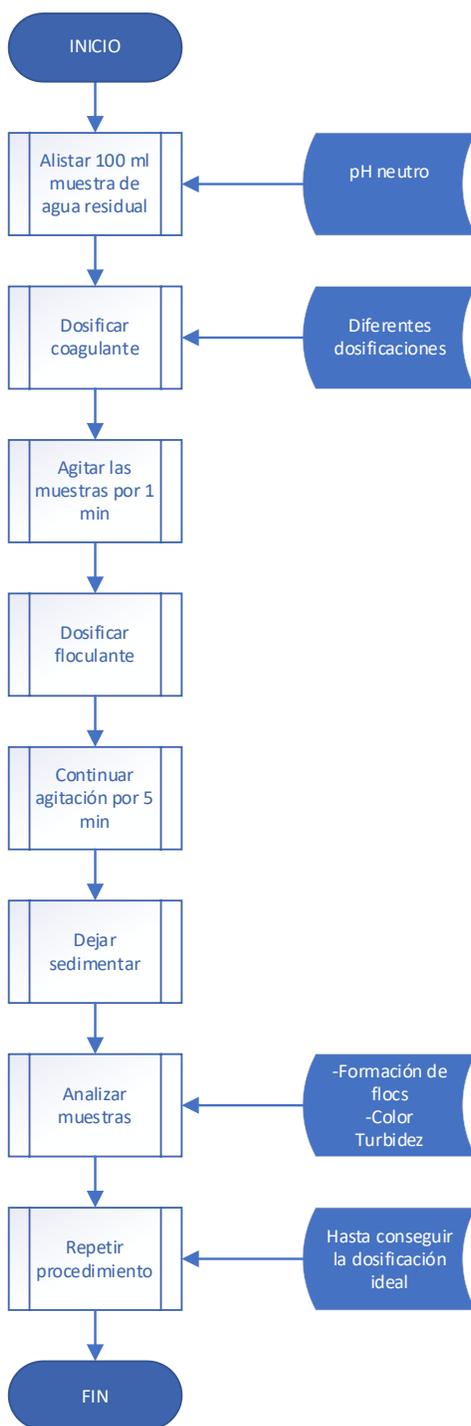
ANEXO F – Flujograma del Procedimiento de neutralización con CO₂

NOTA: Flujograma del procedimiento de Neutralización con CO₂

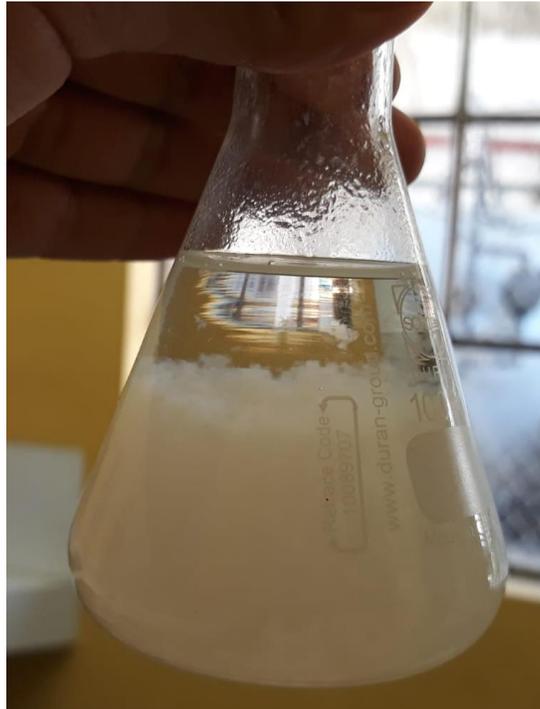
ANEXO G – Flujograma de propuesta de equipo



NOTA: Flujograma de los pasos para propuesta del equipo de neutralización

ANEXO H – Flujograma del tratamiento de clarificación

NOTA: Flujograma de los procesos de coagulación y floculación de las muestras de agua neutralizada

ANEXO I - Muestra de agua residual neutralizada con formación de flóculos

NOTA: En la imagen se observa una ideal formación de flóculos después del proceso de clarificación