

DISEÑO DE UNA TORRE DE AIREACIÓN Y DESGASIFICACIÓN PARA UN
CULTIVO SEMI-INTENSIVO DE TILAPIAS EN LA EMPRESA LUCARVEL.

KEVIN MONTOYA MATÍAS
CHRISTIAN SEBASTIÁN PALACIOS RODRÍGUEZ

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

Director
CLAUDIO ALBERTO MORENO ARIAS
Ingeniero Mecánico

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

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

Claudio Alberto Moreno Arias

Firma del director

Firma del presidente del jurado

Dany José Cárdenas Romay

Firma del jurado

Felipe Correa Mahecha

Firma del jurado

Bogotá, septiembre 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad

Dr. Julio César Fuentes Arismendi

Director de Programa

Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de grado las personas que han estado con nosotros a lo largo de este camino; a nuestros padres por brindarnos consejos para salir de los momentos más complicados y a nuestros familiares que siempre estuvieron ahí para nosotros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos en primer lugar a Dios, que nos acompañó a lo largo de nuestro camino y nos brindó las fuerzas necesarias para culminar con éxito esta etapa de nuestras vidas. A nuestros padres por brindarnos su amor, apoyo y confianza para seguir adelante con cada paso de nuestro camino. A nuestros amigos y ahora colegas los cuales hicieron que la universidad no solo fuese un espacio académico sino también un lugar de esparcimiento.

Queremos también agradecer a los profesores que colaboraron en el desarrollo de este proyecto de grado, al profesor Claudio Moreno por brindarnos su apoyo como director desde el principio, al profesor Luis Figueroa por guiarnos en el desarrollo del proyecto y a todos los que de alguna u otra forma se vieron involucrados.

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

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	20
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	22
1. GENERALIDADES	23
1.1 Lucarvel	23
1.2 Tilapia	23
1.2.1 Nutrición de la tilapia	24
1.2.2 Mercado de la tilapia en Colombia	25
1.2.3 Exportaciones de tilapia	25
1.2.4 Industria acuícola colombiana en medio del COVID-19	26
1.3 Sistema semi-intensivo de producción de tilapia en Colombia	26
1.4 Variables del proceso	28
1.4.1 Temperatura	28
1.4.2 Oxígeno disuelto	28
1.4.3 pH	28
1.4.4 Concentración de amonio	29
1.4.5 Nitritos (NO_2^-)	29
1.4.6 Nitratos (NO_3^-)	29
1.4.7 Dióxido de carbono	29
1.4.8 Dureza	29
1.4.9 Alcalinidad	29

1.5 Enfermedades comunes en la piscicultura (No infecciosas)	30
1.5.1 Variación de la temperatura	30
1.5.2 Variación del pH	30
1.5.3 Enfermedad de las burbujas (GBD)	31
1.5.4 Sólidos en suspensión	32
1.5.5 Toxinas endógenas	32
1.5.6 Lesiones mecánicas	32
1.5.7 Enfermedades nutricionales	33
1.6 Métodos de aireación y desgasificación	33
1.6.1 Torre empaquetada a contracorriente	33
1.6.2 Torre empaquetada de flujo transversal	34
1.6.3 Torre de bandejas	36
1.6.4 Torres de pulverización	37
1.6.5 Métodos químicos	38
2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE CULTIVO	40
2.1 Descripción del proceso en la empresa Lucarvel	40
2.1.1 Técnica Biofloc	41
2.2 Métodos de aireación y desgasificación en la empresa Lucarvel	43
2.2.1 Costos de servicios públicos asociados al proceso	45
2.3 El agua en el proceso del cultivo de tilapias	48
2.3.1 Temperatura	48
2.3.2 pH	50
2.3.3 Concentración de oxígeno disuelto	52

2.3.4	Concentración de amonio	52
2.3.5	Concentración de dióxido de carbono	53
2.3.6	Biofloc	54
2.4	Cumplimiento de los parámetros del agua en la empresa Lucarvel	55
3.	MATRIZ DE SELECCIÓN	57
3.1	Técnicas para la toma de decisión multicriterio	57
3.1.1	Método PUGH	57
3.1.2	Método ELECTRE	57
3.1.3	Método de sumas ponderadas	57
3.1.4	Análisis de sensibilidad	58
3.1.5	Proceso analítico jerárquico	58
3.2	Elección de la técnica de decisión multicriterio	58
3.3	Criterios de evaluación	59
3.4	Elaboración de la matriz de selección	62
4.	TORRE EMPACADA A CONTRACORRIENTE	64
4.1	Funcionamiento	64
4.2	Empaques	64
4.2.1	Empaques al azar	64
4.2.2	Empaques estructurados	65
4.2.3	Criterios para la selección del empaque	66
4.3	Selección del empaque	67
4.3.1	Tipo de empaque	67
4.3.2	Material de construcción	68

4.3.3	Tamaño del empaque	69
4.3.4	Empaque	70
4.4	Condiciones de operación	73
4.4.1	Presión	73
4.4.2	Temperatura	73
4.5	Modelo de cálculo	74
4.5.1	Suposiciones de diseño	75
4.5.2	Condiciones iniciales	75
4.5.3	Relación gas líquido (G/L)	76
4.5.4	Concentración del efluente	79
4.5.5	Velocidad de generación de dióxido de carbono	79
4.5.6	Constante de Henry	80
4.5.7	Factor de stripping	81
4.5.8	Características del empaque	82
4.5.9	Diámetro de la columna empacada	82
4.5.10	Coeficientes de transferencia de masa	86
4.5.11	Altura de la columna empacada	98
4.6	Proceso de aireación en la torre empacada	100
4.7	Constituyentes internos	105
4.7.1	Eliminadores de arrastre	106
4.7.2	Colectores de líquidos	106
4.7.3	Soporte de empaque	107
4.7.4	Distribuidor de líquidos	107

4.8 Sistema hidrodinámico	108
4.8.1 Tuberías	109
4.8.2 Bomba	109
4.8.3 Ventilador	110
4.9 Balance de masa	112
5. SIMULACIÓN DEL PROCESO	116
5.1 Selección del simulador	116
5.2 Selección del modelo termodinámico	118
5.3 Desarrollo de la simulación	120
5.3.1 Definición de sustancias y paquete termodinámico	121
5.3.2 Montaje del proceso	122
5.3.3 Resultados	125
5.3.4 Análisis paramétrico	126
6. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN	129
6.1 Inversión inicial	129
6.2 Costo de operación	130
6.2.1 Costos de personal	130
6.2.2 Costos operacionales	131
6.2.3 Disminución de recambios	133
CONCLUSIONES	134
BIBLIOGRAFÍA	135
ANEXOS	145

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Morfología de la tilapia	24
Figura 2. Cultivo semi-intensivo de tilapias	27
Figura 3. Lesiones provocadas por la enfermedad de las burbujas	31
Figura 4. Torre empaquetada a contracorriente	34
Figura 5. Torre de flujo transversal	35
Figura 6. Torre de bandejas	36
Figura 7. Torre de pulverización	37
Figura 8. Distribución de tanques en la empresa Lucarvel	40
Figura 9. Reacciones de la nitrificación	42
Figura 10. Proceso de nitrificación en el cultivo de tilapias	43
Figura 11. Soplador tipo blower	44
Figura 12. Medidor digital TEKCOPLUS	49
Figura 13. Temperatura en el agua de cultivo	50
Figura 14. Kit de medición de propiedades del agua	51
Figura 15. pH en el agua de cultivo	51
Figura 16. Oxígeno disuelto en el agua de cultivo	52
Figura 17. Amonio en el agua de cultivo	53
Figura 18. Dióxido de carbono en el agua de cultivo	54
Figura 19. Biofloc en el agua de cultivo	54
Figura 20. Tipos de empaques al azar	65
Figura 21. Empaque estructurado	66

Figura 22. Temperatura ambiente	74
Figura 23. Eficiencia de remoción de dióxido de carbono	77
Figura 24. Influencia del G/L sobre el factor de stripping	78
Figura 25. Datos de los anillos Pall 25 mm	82
Figura 26. Gráfica de Eckert	83
Figura 27. Correlación de Onda	86
Figura 28. Gráfica número de unidades de transferencia (NTU)	99
Figura 29. Intercambio de gases en el agua	101
Figura 30. Concentración de oxígeno en el efluente	102
Figura 31. Concentraciones de saturación de oxígeno	103
Figura 32. Constituyentes internos	105
Figura 33. Eliminador de arrastre	106
Figura 34. Distribución del líquido	107
Figura 35. Dimensiones de la torre de aireación y desgasificación	108
Figura 36. Ficha técnica de la bomba	109
Figura 37. Curvas de operación ALTRA-PAK	110
Figura 38. Ficha técnica del blower	111
Figura 39. Diagrama de bloques	113
Figura 40. Árbol de decisión 1	118
Figura 41. Árbol de decisión 2	119
Figura 42. Árbol de decisión 3	120
Figura 43. Definición de las sustancias en Aspen Plus 11	121
Figura 44. Sustancias afectadas por la ley de Henry	121

Figura 45. Selección del paquete termodinámico	122
Figura 46. Corriente de entrada (Aire)	123
Figura 47. Corriente de entrada (Agua)	123
Figura 48. Especificaciones internas de la torre	124
Figura 49. Esquema general del proceso	124
Figura 50. Resultados de la simulación	125
Figura 51. Análisis paramétrico del dióxido de carbono	127
Figura 52. Análisis paramétrico del oxígeno	127
Figura 53. Perfil de oxígeno en un estanque con corrientes de agua	132

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Costo del servicio eléctrico en Lucarvel	46
Tabla 2. Costo del servicio de acueducto en el municipio de Palmira	46
Tabla 3. Gastos de agua del servicio de acueducto en los recambios de agua	48
Tabla 4. Diagnóstico del agua de cultivo en la empresa Lucarvel	55
Tabla 5. Valores de clasificación de criterios	59
Tabla 6. Comparación de criterios por pares	60
Tabla 7. Jerarquía de los criterios de selección	60
Tabla 8. Cuantificación de los criterios de evaluación	61
Tabla 9. Matriz de selección: Método sumas ponderadas	62
Tabla 10. Características de los tipos de empaques	67
Tabla 11. Aplicación de los diferentes materiales de los empaques	68
Tabla 12. Tamaños recomendados de empaques	69
Tabla 13. Descripción de algunos empaques al azar	70
Tabla 14. Usos de los empaques al azar	71
Tabla 15. Condiciones iniciales	76
Tabla 16. Datos necesarios para la correlación de Onda	87
Tabla 17. Volúmenes atómicos de elementos químicos	88
Tabla 18. Volumen molar del dióxido de carbono	89
Tabla 19. Propiedades de las sustancias	90
Tabla 20. Datos y restricciones de la correlación de Onda	93
Tabla 21. Especificaciones del blower PW-4311	111

Tabla 22. Resultados de los balances de materia	115
Tabla 23. Ventajas y desventajas de los simuladores	116
Tabla 24. Porcentajes de error	126
Tabla 25. Precio de los equipos	129
Tabla 26. Nómina para el proceso de cultivo de tilapias	130
Tabla 27. Consumo energético del proceso	132
Tabla 28. Costo de los recambios al aplicar la alternativa diseñada	133

LISTA DE ABREVIATURAS

P	Presión atmosférica [Pa]
H	Altitud [m]
H_{YC}	Constante de Henry (Composición)
H_{PC}	Constante de Henry (Composición-Presión) [atm L/mol]
R	Constante de los gases [0,082 atm L/mol K]
T	Temperatura ambiente [K]
S	Factor de stripping
G/L	Relación gas-líquido volumétrica
G_m/L_m	Relación gas-líquido másica
Q_a	Caudal de aire [L/min]
Q	Caudal de agua [L/min]
ρ_g	Densidad del gas [kg/m ³]
ρ_l	Densidad del líquido [kg/m ³]
G_m	Carga hidráulica del gas [kg/m ² s]
C_f	Factor de empaque [m ⁻¹]
μ_l	Viscosidad dinámica del agua [kg/m s]
μ_g	Viscosidad dinámica del aire [kg/m s]
L_m	Carga hidráulica del agua [kg/m ² s]
D	Diámetro de la torre [m]
A	Área de la torre [m ²]
D_l	Tasa de transferencia de masa en la fase líquida [m/s]
D_g	Tasa de transferencia de masa en la fase gas [m/s]

a_t	Área específica de empaque [m^{-1}]
a_w	Área específica seca de empaque [m^{-1}]
d_p	Tamaño nominal del empaque [m]
g	Gravedad [$9,81 m/s^2$]
σ_c	Tensión superficial del empaque [kg/s^2]
σ	Tensión superficial del agua [kg/s^2]
Re	Número de Reynolds
We	Número de Weber
Fr	Número de Froude
V_b	Volumen molar del CO_2 [cm^3/mol]
M_A	Masa molecular del dióxido de carbono [g/mol]
M_B	Masa molecular del aire [g/mol]
V_A	Volumen molar del CO_2 [L/mol]
$T_{B,A}$	Temperatura de ebullición CO_2 [K]
T_{op}	Temperatura de operación [K]
P_l	Presión de operación [Pa]
r_A	Separación molecular en la colisión del dióxido de carbono [nm]
r_B	Separación molecular en la colisión del aire [nm]
r_{AB}	Promedio de separación molecular [nm]
ϵ_{AB}	Energía molecular de atracción [erg]
ϵ_A	Energía molecular de atracción dióxido de carbono [erg]
ϵ_B	Energía molecular de atracción aire [erg]
k	Constante de Boltzmann [$1,381 \cdot 10^{-16} g cm^2/s^2 K$]

$f(kT/\epsilon_{AB})$	Función de colisión
K_{La}	Constante global de transferencia de masa del dióxido de carbono [s^{-1}]
FS	Factor de seguridad
Z	Altura del lecho empacado [m]
HTU	Altura de unidades de transferencia [m]
NTU	Número de unidades de transferencia
C_o	Concentración inicial de dióxido de carbono [mg/L]
C_e	Concentración del efluente de dióxido de carbono [mg/L]
P_i	Presión parcial del oxígeno [atm]
x_i	Concentración de saturación del oxígeno [mg/L]
H_i	Constante de Henry [atm]
$P_{1 atm}$	Presión del sistema [1 atm]
$P_{0,89 atm}$	Presión del sistema [0,89 atm]
x	Concentración del oxígeno en el aire [mg/L]
V_{CO_2}	Velocidad de generación de dióxido de carbono [mg/min]

RESUMEN

En el presente trabajo de grado se realizó una propuesta de diseño de un equipo de aireación y desgasificación con el fin de controlar el dióxido de carbono disuelto en el agua de cultivo en un sistema de cría de tilapias en la empresa Lucarvel. Inicialmente se realizó un diagnóstico del agua de cultivo para conocer las concentraciones iniciales de los contaminantes de interés. Seguido a esto se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de determinar el equipo ideal para el proceso de aireación y desgasificación teniendo en cuenta criterios como el consumo energético, la eficiencia de separación y la capacidad de adquisición de la empresa, siendo la torre empacada a contracorriente el equipo seleccionado.

Una vez se hizo la selección del equipo se realizó el dimensionamiento teniendo en cuenta los componentes internos del equipo, los flujos de entrada de aire y agua y los parámetros objetivo; la correlación de Onda y la ley de Henry se utilizaron para determinar el comportamiento de transferencia de masa al interior del equipo; este proceso arrojó un equipo con una altura de 0,47 m y un diámetro de 0,536 m. Luego, se realizó una simulación del proceso a través del software ASPEN PLUS 11 con el fin de comprobar el funcionamiento del equipo propuesto.

Finalmente se obtuvo que el costo de implementación de un equipo es de 3.551.420 pesos colombianos y la empresa debe reservar mensualmente 2.559.603 pesos colombianos para los gastos asociados a la mano de obra y los servicios públicos.

Palabras clave: Aireación, desgasificación, acuicultura, simulación, diseño de equipos, matriz de decisión, costo de implementación.

INTRODUCCIÓN

Un cultivo semi intensivo de tilapias maneja una distribución de 2 a 4 peces/m² y un bajo recambio de agua (5-15% día), la alimentación es únicamente con concentrado y es necesario monitorear constantemente la calidad de agua en los estanques y el estado de sanidad de los animales; al no tener los parámetros del agua bajo control se pueden presentar enfermedades, incluso mortales, que afectan el cultivo y por lo tanto la producción de tilapias.

La propuesta de diseño se dirige a la empresa Lucarvel, una empresa familiar dedicada al cultivo y distribución de productos agrícolas como la uva isabella y que actualmente se encuentra incursionando en el cultivo de tilapias. Dada su poca experiencia en el cultivo de especies acuáticas, el proceso no cuenta con un sistema de desgasificación eficiente, lo cual ha venido afectando la producción.

Para evitar la pérdida de producción se hace necesario implementar un sistema de aireación y desgasificación que mantenga controlada la calidad del agua de cultivo sin afectar el bienestar y el ambiente de los peces, generando un beneficio para la empresa sin sacrificar la calidad de producto que han venido manejando hasta el momento.

Es por esto por lo que el presente trabajo de grado presenta de manera detallada el diseño de un equipo para aireación y desgasificación del agua de cultivo; partiendo desde una revisión bibliográfica de las alternativas existentes, un diagnóstico del agua de cultivo en la empresa Lucarvel, el dimensionamiento del equipo, la simulación del proceso y la evaluación de los costos de implementación de la alternativa al proceso.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar una torre de aireación y desgasificación para el cultivo semi-intensivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración de gases disueltos en el agua de cultivo
- Seleccionar la alternativa de diseño que cumpla con los requerimientos del proceso.
- Desarrollar la simulación del proceso que corrobore el funcionamiento de la alternativa de diseño seleccionada.
- Establecer los costos para la implementación de la torre de aireación en la empresa Lucarvel.

1. GENERALIDADES

1.1 Lucarvel

Lucarvel es una empresa familiar fundada en 2015 dedicada a la producción y distribución de mermelada de uva isabella (*Vitis labrusca*) ubicada en el Km 2 vía Santa Elena La novillera finca campestre “El Zakatin”; actualmente la compañía está incursionando en el cultivo semi-intensivo de tilapia roja (*Oreochromis sp*).

1.2 Tilapia

El término tilapia proviene de la palabra bosquimana africana que significa pez. A lo largo de los años la taxonomía de la tilapia ha sido ampliamente estudiada, sin embargo, uno de los estudios más recientes realizados por Froese y Pauly en 2018 establece que la especie tilapia se divide en tres géneros: *Oreochromis*, *Sarotherodon* y *Tilapia*. [1]

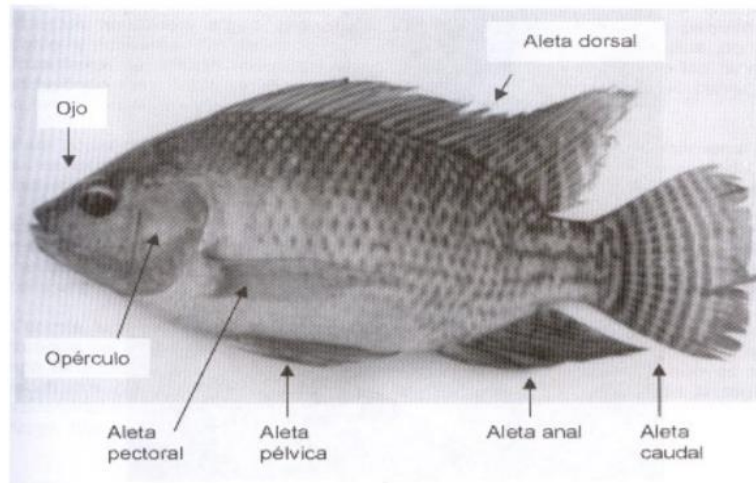
La tilapia es uno de los peces más importantes en la acuicultura a nivel mundial, y es el pez de mayor importancia económica en la producción de agua dulce en diferentes países del continente americano. [2]

Como se puede observar en la Figura 1, el cuerpo de las tilapias está cubierto de escamas cicloides que son difíciles de desprender; las aletas dorsal y anal tienen espinas duras; las aletas del pectoral y de la pelvis son grandes y rígidas lo que le permite al pez tener un control sobre la natación y las maniobras que realiza. Debido a que el pez usa las aletas para la locomoción desarrollaron unos músculos que le permiten nadar a velocidades bajas con movimientos continuos. [3]

El número de escamas, vertebras, espinas y aletas se utilizan ampliamente para la identificación de especies. Las principales especies de tilapias cultivadas se pueden distinguir por patrones de bandas en las aletas y por su pigmentación en la región de la garganta, sin embargo, el método de clasificación por pigmentación es poco confiable debido a que puede verse afectado por el ambiente, el estado de madurez sexual y la fuente de alimento. [4] La identificación de la especie en un pez individual se puede complicar debido al entrecruzamiento natural de especies. [1]

Figura 1.

Morfología de la tilapia



Nota. La imagen muestra la morfología externa de una tilapia de río. Tomado de: Coastal Resources Center, “MANEJO DEL CULTIVO DE TILAPIA”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/dIJ5N8Z> [Acceso: feb.28, 2021]

1.2.1 Nutrición de la tilapia

El contenido nutricional del alimento depende de la etapa de vida en la que se encuentre la tilapia, sin embargo, en todas las etapas se debe cumplir con cierta dieta para el correcto crecimiento y desarrollo del pez.

Cuando el cultivo se realiza en estanques cerrados con una alta densidad de peces es muy difícil alimentarlos de forma natural (algas, plancton, invertebrados, etc.) por lo tanto es necesario complementar la dieta con suplementos alimenticios que contengan proteínas, lípidos, carbohidratos, vitaminas y minerales.

La proteína es el componente más costoso en la alimentación de los peces, generalmente proviene de fuentes vegetales como la soya y la proporción recomendada para una tilapia es de 35-40% en su etapa adulta. [5]

Los lípidos son nutrientes que aportan una elevada cantidad de energía al pez, en la acuicultura se pueden usar para reemplazar la proteína y disminuir los costos de alimentación; para una tilapia el porcentaje recomendado varía entre el 7-15% y son los responsables del transporte de vitaminas [1]

Los carbohidratos no son esenciales en la dieta, pero son los menos costosos, muchas empresas acuícolas los incluyen en la dieta para disminuir los costos del proceso. En los peces los carbohidratos son almacenados como glucógeno que puede utilizarse para satisfacer las demandas energéticas, a pesar de eso, el pez solo puede extraer 1.6 calorías por cada gramo de carbohidrato, mientras que los mamíferos extraen 4 calorías en la misma cantidad. [6]

Las vitaminas y los minerales son compuestos necesarios para el correcto crecimiento y desarrollo del pez, la ausencia de estos componentes puede generar un crecimiento poco acelerado y patologías como la escoliosis.

Existen adicionalmente técnicas que involucran microorganismos para complementar la dieta del pez, estas técnicas requieren de un constante recambio de agua y entre ellas encontramos el biofloc, el objetivo de esta técnica es disminuir costos en alimentación sin afectar la calidad y el desarrollo del pez. [5]

1.2.2 Mercado de la tilapia en Colombia

Colombia es un país consumidor de pescados de agua dulce y la tilapia se ubica como el más consumido. La producción nacional de pescado es de 127.000 toneladas de las cuales 100.000 toneladas son de tilapia, y el consumo per cápita es de 6.9 kg. Huila, Antioquia, Meta y Tolima se ubican actualmente como los departamentos de mayor producción de tilapias y Amazonas y Boyacá los más consumidores de este tipo de pez. [5], [7]

1.2.3 Exportaciones de tilapia

Según cifras del Ministerio de Agricultura la exportación de tilapia colombiana ha tenido un crecimiento constante en los últimos años. En el periodo comprendido entre enero y agosto del año 2020 Colombia ha exportado aproximadamente 7120 toneladas

de tilapia que fueron valoradas en US \$36 millones, representando un aumento del 47% en toneladas y 21% en valor respecto al mismo periodo del año pasado, siendo Estados Unidos el mayor consumidor con el 96,1% del total de exportaciones de tilapia; el porcentaje restante se exporta a Perú, Reino Unido y Alemania. [8]

1.2.4 Industria acuícola colombiana en medio del COVID-19

Con el cierre de fronteras provocado por la pandemia el transporte de los productos desde las fincas a los centros de almacenamiento y distribución tuvo un incremento de tiempo y de costos afectando principalmente a los cultivadores piscícolas artesanales.

Las ventas tuvieron una disminución debido al cierre de establecimientos como restaurantes y hoteles, grandes consumidores de pescado, así como la disminución de ingresos en muchos hogares colombianos teniendo en cuenta que el pescado es una proteína de mayor costo frente a otras de precio más asequible. [9]

Los altos costos de mantenimiento de los cultivos sumado a las bajas ventas y los impedimentos de la crisis de salud generaron que muchos productores cerraran sus negocios al entrar en pérdidas.

En el ámbito internacional las exportaciones se vieron beneficiadas por el aumento de la TRM la cual refleja un incremento aproximado del 12,55% en el valor promedio respecto al año 2019, sin embargo, esta misma situación afectó a los productores nacionales debido a que muchos insumos para el mantenimiento de los cultivos vienen del exterior. Las importaciones disminuyeron principalmente por temas preventivos en los mercados internacionales, por lo tanto, la demanda nacional fue cubierta por productores locales. [8]

1.3 Sistema semi-intensivo de producción de tilapia en Colombia

Un cultivo semi-intensivo es aquel sistema de producción de tilapia en el cual se tiene control total sobre el agua de cultivo y las especies cultivadas; la alimentación en este caso se refuerza con suplementos y fertilizantes para aumentar la producción sin necesidad de aireación mecánica. [10]

Es recomendado para productores que no tienen grandes cantidades de dinero para invertir y/o donde no es fácil conseguir alimentos de buena calidad. Los estanques que se utilizan pueden llenarse y drenarse a gusto del cultivador y suelen tener un tamaño de pocos metros cuadrados; la tasa de siembra varía entre 50.000 a 100.000 peces/Ha.

Este sistema requiere un recambio de agua de 50 al 60% mensual; en estos recambios se utilizan filtros para eliminar la materia orgánica que no pertenezca al cultivo. [3] [11] La Figura 2 muestra como es un cultivo semi intensivo de tilapias.

Figura 2.

Cultivo semi-intensivo de tilapias



Nota. Cultivo de tilapias en un sistema semi-intensivo conformado por tanques. Tomado de: Piscicultura, “Clasificación de la piscicultura”, [En línea]. Disponible <https://cutt.ly/QICEqmD> [Acceso: feb 28, 2021]

Es el tipo de piscicultura más empleado en Colombia, debido al bajo nivel de inversión y un control básico del sistema. En 2019 el departamento con la mayor producción de tilapia por medio de un sistema semi-intensivo fue el Huila con el 43% en la participación nacional, seguido del Meta con 13% y entre Tolima, Cundinamarca, Boyacá y Antioquia suman el 5%, el porcentaje restante lo aportan los otros departamentos del país. [12] [13]

1.4 Variables del proceso

La tilapia es una de las especies más resistentes en un cultivo piscícola, puede soportar condiciones extremas en cuanto a la calidad del agua o manipulación física en el entorno donde se desarrolla, sin embargo, hay que tener controlados los parámetros para garantizar la calidad del agua y un correcto desarrollo de la tilapia.

No existe un valor predeterminado para los parámetros de cultivo de tilapias; el comportamiento de un cultivo varía dependiendo la ubicación de este y el trato que se le realice, no obstante, para efectos de estudio se establecerán en este documento unos rangos para las variables basados en los artículos "*Tilapia- Biology, Culture and Nutrition*" y "*Recirculating Aquaculture*". [1]

1.4.1 Temperatura

El rango de temperatura para el crecimiento óptimo de la tilapia esta entre 27°C y 29°C, sin embargo, también se reportan tasas de crecimiento aceptables de 25°C a 32°C. Las altas temperaturas dificultan mantener la concentración de oxígeno disuelto y las temperaturas menores a 15°C inhiben el crecimiento del pez. [14]

1.4.2 Oxígeno disuelto

Se recomienda un nivel de oxígeno disuelto entre 5 y 7.5 mg/L; el crecimiento del pez se verá afectado por concentraciones por debajo de 3.5 mg/L, aun así, puede sobrevivir a una concentración de 0.8 mg/L en una exposición menor a 10 minutos. [15]

1.4.3 pH

La tilapia puede sobrevivir en un amplio rango de pH (5-10) pero es recomendable de 6 a 9. Cuando se cultiva en tanques el nivel de dióxido de carbono disminuye el pH por la formación de ácido carbónico. Un pH bajo no es peligroso en un sistema de flujo continuo, pero si en sistemas de recirculación de agua con biofloc en el que el pH mínimo es de 6,8 debido al límite de tolerancia de las bacterias nitrificantes. En sistemas de tanques un pH elevado no es preocupante porque la concentración de dióxido de carbono lo nivela. [15]

1.4.4 Concentración de amonio

El amonio (NH_4^+) y el amonio no ionizado (NH_3) son las sustancias más tóxicas en el cultivo acuático. El amonio es menos tóxico que el amonio no ionizado, por lo tanto, se debe asegurar una concentración de amonio no ionizado menor a 1 mg/L. [14]

1.4.5 Nitritos (NO_2^-)

El nitrito se debe mantener en una concentración menor a 5 mg/L para evitar su toxicidad. Si la concentración de nitrito es elevada se añade ion cloruro para controlar la toxicidad, este ion se puede agregar como cloruro de sodio o cloruro de calcio. [15]

1.4.6 Nitratos (NO_3^-)

La toxicidad por los nitratos ocurre cuando la relación nitrato-nitrógeno supera los 400 mg/L. El recambio de agua o la remoción de sólidos del tanque generalmente reducen la concentración de nitratos, pese a esto, algunos sistemas pueden requerir procesos de desnitrificación adicionales. [14]

1.4.7 Dióxido de carbono

Se recomienda mantener la concentración de dióxido de carbono menor a 40 mg/L. Los niveles elevados de esta sustancia causan letargo (somnolencia) en el pez, lo que provoca una respuesta lenta que puede llegar a ser mortal. Como ya se mencionó anteriormente el dióxido de carbono altera el pH por lo cual es necesario tener un control sobre la concentración de esta sustancia. [15]

1.4.8 Dureza

El calcio disuelto en el agua ayuda a la osmorregulación y alivia el estrés en los peces. Generalmente se la añade al cultivo cloruro de calcio y su concentración debe estar entre 50 y 100 mg/L.

1.4.9 Alcalinidad

Esta variable mide la capacidad amortiguadora del pH del agua, esta variable debe mantener unos valores entre 150 y 250 mg/L. Para lograrlo se añade bicarbonato de sodio ya que es un compuesto de fácil acceso, económico, completamente soluble y de

fácil manejo. Se recomienda utilizar en el cultivo una fuente de agua con alta alcalinidad para disminuir los costos del cultivo. [14]

1.5 Enfermedades comunes en la piscicultura (No infecciosas)

La FAO en su manual básico de sanidad piscícola clasifica las enfermedades más comunes de los peces en enfermedades de origen no infeccioso y enfermedades infecciosas. Las enfermedades no infecciosas son las que están ligadas al cambio de las variables del proceso; por otro lado, las infecciosas son las que se adquieren por acción de los microorganismos que se introducen en el tejido del pez y crean una infección o infestación. [10]

Para el caso específico de este proyecto se van a mencionar las enfermedades de origen no infeccioso debido a que el objetivo del estudio consiste en diseñar una torre de aireación y desgasificación que se encargue de mantener las variables en los rangos recomendados y de esta forma prevenir las enfermedades que posteriormente serán descritas.

1.5.1 Variación de la temperatura

Los peces son poiquilotérmicos, es decir, varían su temperatura de acuerdo con el ambiente en el que viven. Para las especies cultivadas en Colombia los niveles de adaptación varían entre 18 y 30°C; cuando se presentan variaciones súbitas de temperatura (agudas) o se mantiene una temperatura extrema (críticas) por periodos prolongados de tiempo el pez puede presentar estrés, disminución de las defensas y reducción del apetito lo que puede provocar la muerte. La disminución de las defensas y el estrés hacen vulnerable al pez a contraer enfermedades causadas por agentes patógenos ya que estos tienen una mayor resistencia a los cambios de temperatura. [3]

1.5.2 Variación del pH

El oxígeno, la temperatura y el pH son las variables que cambian de acuerdo con la hora del día. En horas de la madrugada los niveles de oxígeno disuelto en el agua y el pH son bajos; con la presencia de la luz solar en el día el fitoplancton presente produce oxígeno aumentando la concentración de oxígeno disuelto y el pH.

Los peces pueden sobrevivir a altos niveles de pH, pero no toleran una variación brusca en sus valores, cuando llueve y los estanques no tienen un control de entrada de agua apropiado el pH disminuye de manera abrupta provocando una lesión aguda en las branquias que les provocan disfunción respiratoria y muerte a los peces, adicional también generan lesiones en la piel, las aletas y la córnea. [11]

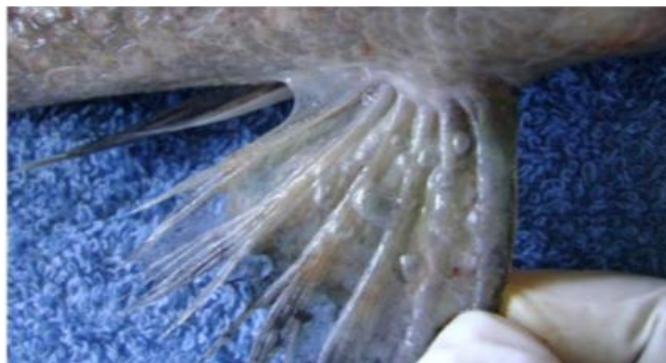
1.5.3 Enfermedad de las burbujas (GBD)

Gas Bubble Disease es una enfermedad no infecciosa provocada por la sobresaturación de gases disueltos. Las lesiones en los peces son causadas por la acumulación de burbujas de gas en el sistema vascular y los tejidos.

La enfermedad se causa principalmente por la sobresaturación de oxígeno y nitrógeno, sin embargo, el gas disuelto total genera más peso que la concentración de gas disuelto individual. En la Figura 3 se pueden observar las lesiones provocadas por la GBD.

Figura 3.

Lesiones provocadas por la enfermedad de las burbujas



Nota. Lesiones en las aletas de un pez provocadas por la enfermedad de las burbujas. Tomado de: FAO, “Manual básico de sanidad piscícola”, [En línea]. Disponible <https://cutt.ly/kzdiBy2> [Acceso 1 mar, 2021]

La sobresaturación ocurre cuando el agua contiene una mayor cantidad de gases disueltos de la que puede contener a una presión y temperaturas dadas. A altas presiones y bajas temperaturas la cantidad de gases que puede almacenar el agua es mayor, no obstante, estas condiciones en un cultivo de peces pueden ser bastante perjudiciales para el cultivo. [14]

1.5.4 Sólidos en suspensión

Las partículas de distintos materiales en el agua pueden quedar impregnadas en la piel del pez y generar problemas en las branquias.

Este tipo de materiales pueden ser obtenidos a través de los afluentes que llenan el estanque como los residuos de materia orgánica proveniente de los alimentos, teniendo en cuenta que la tasa de asimilación del alimento por parte de los peces oscila entre el 70% y 75%. [16]

La gravedad de estas enfermedades depende de la cantidad de partículas presentes en el medio y su naturaleza. Las más perjudiciales son las partículas duras ya que estas pueden llegar al tanque fácilmente y sedimentarse en el fondo, permaneciendo más tiempo en el tanque.

1.5.5 Toxinas endógenas

En los estanques en donde la calidad del agua no es controlada, los desechos de los peces (amoníaco y nitrito) pueden producir un efecto tóxico en los peces en elevadas concentraciones.

Las patologías que conllevan esta elevada concentración son branquiales y disfunción renal (nefro calcinosis)

1.5.6 Lesiones mecánicas

Las actividades rutinarias de limpieza y mantenimiento de los tanques en un sistema con alta densidad de peces pueden provocar la pérdida de escamas y dejar al pez más vulnerable a infecciones debido a las zonas desprotegidas de la piel. [10]

Generalmente no es una situación de alto riesgo, pero en ocasiones se generan úlceras profundas que conllevan al fallo en el control osmorregulador del pez. Para mitigar este problema se disminuye al máximo la manipulación mecánica del sistema.

1.5.7 Enfermedades nutricionales

Los requerimientos nutricionales de un cultivo de tilapias son muy estrictos; la baja calidad del alimento se determina por la escasa disponibilidad de nutrientes en la ración o del almacenamiento inadecuado del producto.

La desnutrición se identifica fácilmente mediante la observación del pez, este presenta malformaciones en el esqueleto y pérdida de peso además de provocar agresividad. [4]

1.6 Métodos de aireación y desgasificación

Actualmente existen métodos y equipos usados en el tratamiento de aguas que tienen el objetivo de realizar el proceso de aireación y desgasificación; teniendo en cuenta los resultados de las muestras de agua se procede a realizar una revisión bibliográfica de estos métodos y una posterior elección de la alternativa más conveniente para la empresa Lucarvel.

1.6.1 Torre empaquetada a contracorriente

Una torre empacada cuenta con cuerpos sólidos o inertes que reciben el nombre de empaques; el aire entra por la parte inferior de la torre y se va elevando debido a su densidad, entrando en contacto con los empaques, por otro lado, el agua del proceso piscícola entra por la parte superior de la torre y desciende entrando en contacto con el aire y los empaques. El objetivo de los empaques es generar un constante contacto entre el agua y el aire, minimizando el grosor de la capa del agua y facilitando la transferencia de masa para eliminar contaminantes como el amoníaco, el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno. [17]

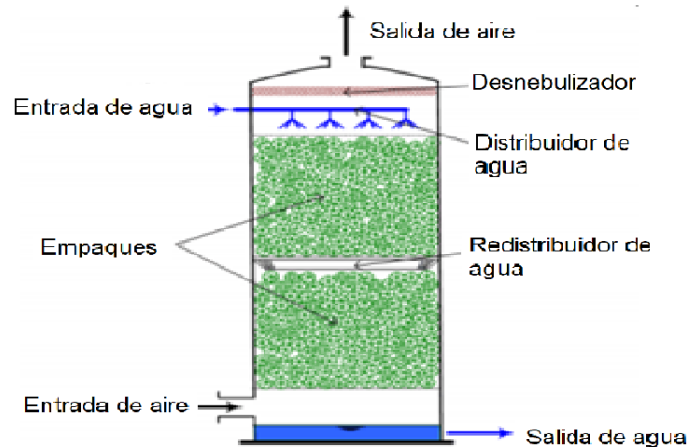
Comercialmente este tipo de torres vienen con materiales inertes y económicos como la cerámica o plástico, que están ubicados de forma estructurada o de forma

aleatoria. Para que un empaque se considere como bueno debe proporcionar espacios vacíos y caídas de presión bajas del gas.

Los empaques de forma aleatoria son aquellos que se instalan en la torre sin un orden en específico, para la elección de estos empaques se tiene en cuenta la resistencia a la corrosión, el peso y el área superficial. En las torres estructuradas los empaques se organizan en cuadrículas o en mallas lo que permite una menor caída de presión, sin embargo, son costosos y no recomendables para una torre de pequeñas dimensiones.

Figura 4.

Torre empaquetada a contracorriente



Nota. Torre de aireación empaquetada a contracorriente. Tomado de: Tripoli University, “Volatile Organic Chemicals Removal from Contaminated Water using Air Stripping Low Profile Sieve Tray Towers”, [En línea]. Disponible <https://cutt.ly/lzGmW7Y> [Acceso 10 mar, 2021]

1.6.2 Torre empaquetada de flujo transversal

Las torres de flujo transversal son generalmente utilizadas como torres de enfriamiento, pero también pueden considerarse como torres de aireación y

desgasificación ya que cuenta con un suministro de agua por la parte superior de la torre, donde el agua desciende lentamente por un relleno plástico mientras el flujo de aire corre transversalmente en la dirección del agua generando la transferencia de masa; esta torre cuenta con un ventilador en la parte superior para succionar el aire que entra a la torre y enviarlo a la atmósfera junto con los contaminantes retirados. [18]

El costo de implementación de este equipo es menor que el de una torre empacada a contracorriente y su eficiencia depende del área que se tenga disponible para la construcción de la torre, puesto que a mayor área mayor transferencia de masa.

Figura 5.

Torre de flujo transversal



Nota. Torre de aireación de flujo transversal utilizada para el tratamiento de aguas. Tomado de: Mundo HVACR, “Torres de enfriamiento”, [En línea]. Disponible <https://cutt.ly/GzGZF5t> [Acceso 10 mar,2021]

Este tipo de torre proporciona un área interfacial menor para la transferencia de masa, pero un mayor contacto aire-líquido, por otro lado, las torres empacadas proporcionan una superficie más interfacial pero menor contacto entre las fases.

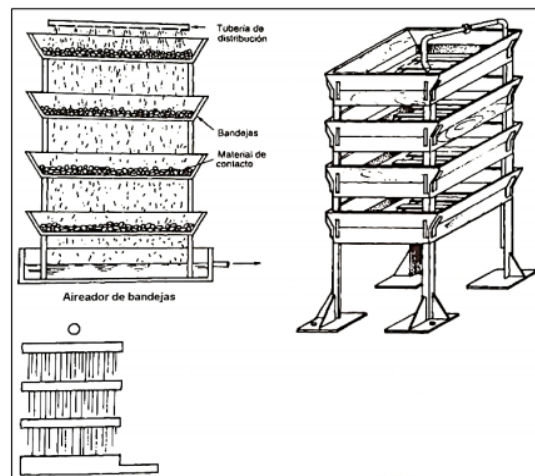
Se recomienda el uso de estas torres cuando se requiere oxigenar el agua o cuando se requiere eliminar un gas de una corriente de agua, con la ventaja de tener un diseño compacto.

1.6.3 Torre de bandejas

Este tipo de torres está compuesto principalmente por bandejas, generalmente de fibra de vidrio o plástico, que tienen perforaciones sobre ellas, las bandejas tienen una pequeña inclinación para la correcta distribución del agua. [19]

Figura 6.

Torre de bandejas



Nota. Torre de aireación de bandejas para la oxigenación del agua. Tomado de: Universidad técnica de Machala, “Diseño de planta de tratamiento de agua potable por el método de aireación y filtrado”, [En línea] Disponible: <https://cutt.ly/FzHqnvX> [Acceso 10 mar, 2021]

El agua es bombeada desde el estanque de cultivo, al llegar a la superficie de la torre pasa por un dispersor que se encarga de la distribución uniforme del agua sobre la primera bandeja, el agua baja por las perforaciones y vuelve al estanque de cultivo.

Cuando el agua pasa de bandeja a bandeja se genera la transferencia de masa, el área de contacto aire-agua es elevada y facilita la entrada del oxígeno en la molécula y la salida de los gases no deseados en el proceso.

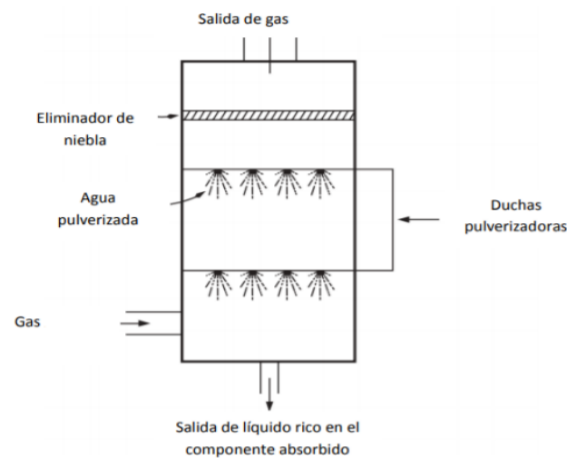
Se suele colocar un filtro de carbón coque para eliminar compuestos tóxicos generados en el proceso, sin embargo, esto solo depende de la naturaleza misma del cultivo, pueden aplicarse otras sustancias que filtren el agua y salga con una mejor calidad.

1.6.4 Torres de pulverización

Las torres de pulverización consisten en una torre con aspersores, estas funcionan dispersando el agua de cultivo en una torre con aire

Figura 7.

Torre de pulverización



Nota. Torre de pulverización de agua. Tomado de: Univesitat Politècnica de València, “Diseño de un sistema para la recuperación de vapores amoniacales de una corriente gaseosa procedente de una fábrica de fertilizantes químicos”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/hzHiwNd> [Acceso 10 mar, 2021]

Las gotas dispersadas entran en contacto con el aire, se oxigenan y liberan los gases no deseados, volviendo de nuevo al sistema de cultivo con buena calidad. [18]

Son las torres que menor requerimiento energético tiene y es de fácil instalación; para llevar a cabo el proceso con una de estas torres es necesario tener en cuenta el tamaño de la gota, la velocidad, el ángulo de dispersión y la presión de dispersión. Si no se tienen en cuenta estos aspectos el agua puede pasar por el proceso de ebullición y salir por la parte superior de la columna.

En las torres de pulverización el contacto entre el agua y el aire es más eficaz en la región donde se forman las gotas, esto ocurre debido a una mayor transferencia de masa en las gotas recientemente formadas; los sistemas de pulverización son los que tienen la capacidad de transferencia menos efectiva y por lo tanto es necesario más de un ciclo para eliminar los compuestos no deseados en el agua. [20]

Una alternativa para aumentar la transferencia de masa en estos sistemas es utilizar varios sistemas de pulverización a lo largo de la torre.

1.6.5 Métodos químicos

Actualmente la industria química ofrece soluciones para extraer los gases de una corriente de agua, sin embargo, estos métodos son bastante específicos, por lo que para eliminar más de un compuesto de una corriente de agua se requiere una alta inversión. [21]

Para la eliminación del dióxido de carbono del agua de cultivo puede utilizarse la absorción química con carbonato de potasio (K_2CO_3), la cual arroja como resultado la formación de bicarbonato de potasio ($KHCO_3$) [22]. El bicarbonato de potasio es utilizado en los cultivos acuícolas para mantener la alcalinidad del agua.

Otras técnicas para la desgasificación del agua incluyen tratamientos con hidracina (N_2H_4), aminas o sulfito de sodio (Na_2SO_3) que cumplen la función de secuestrantes [23], que como su nombre lo indica su función es secuestrar la molécula del gas disuelto en el agua; sin embargo, así como elimina el dióxido de carbono disuelto

también elimina el oxígeno disuelto en el agua; por lo que este tipo de técnicas puede ser descartada para el objetivo de este trabajo de grado.

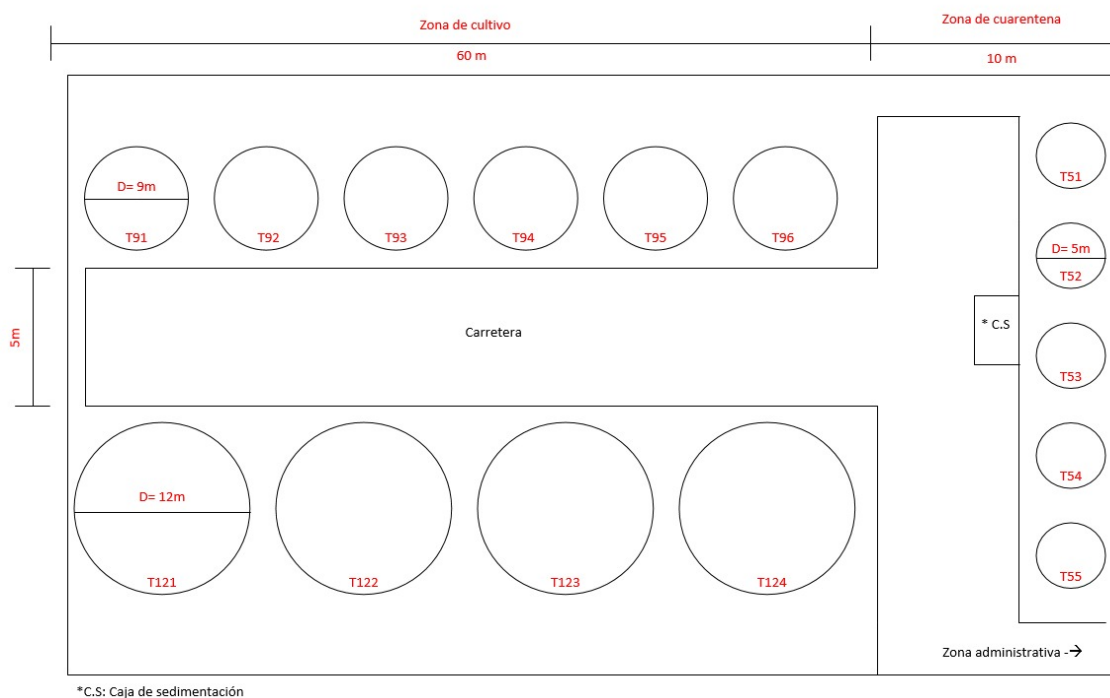
2. DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE CULTIVO

2.1 Descripción del proceso en la empresa Lucarvel

Lucarvel maneja un cultivo semi-intensivo de tilapias que cuenta con 3 etapas; cada una de las etapas se lleva a cabo en un tanque de diferente diámetro. La distribución de los tanques en la empresa se ve en la Figura 8.

Figura 8.

Distribución de tanques en la empresa Lucarvel



Nota. Planos de vista superior de la distribución del proceso del cultivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

La primera etapa, denominada cuarentena, consiste en un tanque de 5 metros de diámetro en el cual se realiza la siembra de 10400 alevines que estarán en este tanque hasta alcanzar un peso promedio de 29 gramos/alevín (6-8 semanas), esta etapa es crítica debido a que es en la cual el pez tiene menos probabilidades de sobrevivir.

La segunda etapa se desarrolla en tanques de 9 metros de diámetro, en los cuales alcanza un peso promedio de 140 gramos/pez; en esta etapa se presenta una sobrevivencia del 98% en un tiempo de 6-8 semanas.

Por último, se trasladan las tilapias a tanques de 12 metros de diámetro en donde alcanzarán un peso promedio de 500 gramos/pez (etapa de engorde); el tiempo de permanencia en estos tanques es de 11-12 semanas. Posterior a eso pasa al proceso de fileteado y empaquetado para su respectiva comercialización.

La cantidad de alimento suministrado en cada una de las etapas es determinante para establecer el número de recambios de agua; en el proceso manejado en Lucarvel, el alimento en la primera etapa se compone de un porcentaje alto de proteína y va disminuyendo de etapa a etapa; la acumulación de alimento proteico en el fondo del estanque aumenta la producción de nitrógeno amoniacal, lo que genera un mayor recambio de agua.

2.1.1 Técnica Biofloc

Para la empresa es importante el uso de nuevas tecnologías que permitan mejorar el proceso de cultivo de tilapias; por lo tanto, se implementó con el cultivo la técnica biofloc.

La técnica biofloc consiste en mantener un alto nivel de flóculos de bacterias microbianas en un ambiente de constante aireación y adición de carbohidratos para permitir la descomposición del material orgánico por medio de una etapa del ciclo del nitrógeno denominada nitrificación. [24]

Una de las mejores alternativas que puede tener la industria agropecuaria es la implementación de la tecnología biofloc, la cual se caracteriza por tener un control de calidad de agua y por proporcionar proteína de origen bacteriano (flóculos), los cuales están principalmente formados por una relación de C/N en el agua, teniendo como consecuencia un mínimo o nulo recambio de agua en los estanques. [25]

Los flóculos están formados por bacterias, fitoplancton y materia orgánica particulada (excretas y restos de alimento); el floculo contiene de 60 a 70% de materia

orgánica, donde las células microbianas tienen del 2 al 20% y del 30 al 40% de materia orgánica, conteniendo así el agua entre 50 y 200 micras. [25]

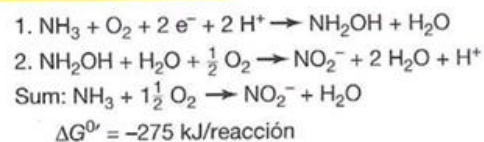
Entre las bacterias que componen el biofloc se encuentran las *nitrosomonas* y las *nitrobacter*. Las bacterias *nitrosomonas* son las que intervienen en la oxidación del ion amonio a ion nitrito; este tipo de bacterias se desarrollan en un pH de 6 a 9 y una temperatura entre 20 y 30°C y usan los electrones de la oxidación del amonio para producir energía. Las *nitrobacter* intervienen en la oxidación del ion nitrito al ion nitrato; su temperatura de crecimiento óptimo para este tipo de bacterias es de 28°C en un rango de pH entre 7,6 y 7,8. [26]

Las bacterias llevan a cabo la nitrificación. La nitrificación es un proceso aeróbico en el cual se convierte el amoniaco en nitrito y luego en nitrato. En la oxidación del amoniaco a nitrito intervienen las enzimas amonio mono oxigenasa e hidroxilamina oxidorreductasa y se genera energía en pequeñas cantidades. [27] En la Figura 9 se observan las reacciones que se llevan a cabo en el proceso de nitrificación.

Figura 9.

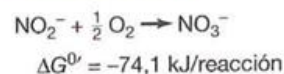
Reacciones de la nitrificación

Bacterias nitrosificantes



Nitrosomonas

Bacterias nitrificantes



Nitrobacter

Nota. Reacciones del ciclo del nitrógeno en la piscicultura.

Tomado de: The nature education, “The Nitrogen Cycle: Processes, Players, and Human Impacts”, [En línea].

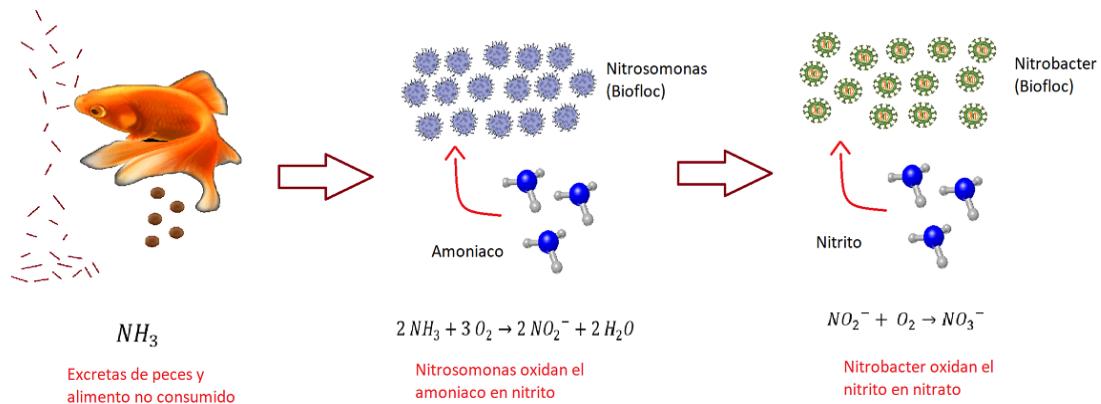
Disponible <https://cutt.ly/Q13l8Vr> [Acceso: 1 mar, 2021]

En el cultivo de tilapias el proceso de nitrificación utiliza el amonio que se genera por las excretas de los peces y el alimento no consumido que se sedimenta en el fondo de los estanques, este amonio es capturado por los flóculos (biofloc) y se genera el

proceso de nitrificación, obteniendo iones nitratos contenidos en los flóculos que posteriormente son consumidos por las tilapias, como se puede observar en la Figura 10.

Figura 10.

Proceso de nitrificación en el cultivo de tilapias



Nota. Proceso de nitrificación en el cultivo de tilapias a partir de la excreta de los peces cultivados.

2.2 Métodos de aireación y desgasificación en la empresa Lucarvel

Actualmente la empresa Lucarvel cuenta con un procedimiento para realizar la aireación del agua y otro completamente diferente para la desgasificación de esta.

Para mantener el agua en los niveles de oxígeno adecuados para el cultivo se utiliza un soplador de aire conocido como blower. Un blower es una turbina que inyecta aire al sistema mediante la compresión del aire por medio de rotores; la ventaja de este equipo es que requiere un mínimo mantenimiento ya que no hay fricción de los componentes en su interior lo que no genera desgaste, y presenta una alta eficiencia de oxigenación, sin embargo, no es eficiente desgasificando el agua de cultivo. El sistema de aireación actualmente permanece encendido las 24 horas del día.

Figura 11.

Soplador tipo blower



Nota. Separador tipo blower utilizado en la empresa Lucarvel. Tomado de: Acuagranja S.A.S, “Blower regenerativo sweetwater”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/pbapdVO> [Acceso 20 abr, 2021]

Por otro lado, para disminuir la concentración de gases disueltos la empresa Lucarvel presupuestó un recambio de agua diario; estos recambios se realizan drenando la mitad de volumen de agua de los tanques de cultivo, la cual pasa a una caja de sedimentación y los estanques vuelven a recuperar su volumen con agua bombeada desde un lago de propiedad de la finca. En esta etapa del proceso se utiliza una bomba de 1 HP que permanece encendida durante 30, 100 o 177 minutos de acuerdo con el estanque que se esté tratando.

Una caja de sedimentación es una caja ubicada en un espacio específico en el suelo a donde llega el agua drenada de los tanques, allí se filtra y se distribuye en la finca para ser usada como agua de riego; la materia orgánica retirada de los filtros se usa como fertilizante en el proceso de cultivo de la uva isabella.

Para la empresa es complicado mantener los gastos asociados al alto consumo de agua y energía, es por esta razón que Lucarvel busca una alternativa de aireación y desgasificación que disminuya los gastos y sea eficiente para su proceso.

2.2.1 Costos de servicios públicos asociados al proceso

Debido a la necesidad de mantener el uso constante de los equipos para la aireación y la desgasificación, los costos de los servicios públicos pasan a ser parte de los gastos de producción.

En primer lugar, se realiza una estimación del costo del servicio eléctrico, para ello se tiene en cuenta el valor por kWh definido por Celsia de Colombia S.A, empresa que presta el servicio eléctrico en la empresa, además de los consumos de los equipos involucrados en los procesos y el tiempo de operación en cada estanque.

El costo del servicio de energía se obtiene a partir de la Ecuación 1.

Ecuación 1.

Costo de energía

Costo energía

$$= \text{Consumo equipo (kW)} * \text{tiempo de operación (h)} * 30 \text{ días} \\ * \text{Tarifa de energía} \left(\frac{\text{COP}}{\text{kWh}} \right)$$

El modelo de cálculo para determinar el costo de operación del blower se puede observar a continuación.

$$\text{Costo energía} = 0,75 \text{ kW} * 24 \text{ h} * 30 \text{ días} * 529,25 \frac{\text{COP}}{\text{kWh}}$$

$$\text{Costo energía} = 285.795 \text{ COP}$$

Los datos de los demás equipos involucrados en el proceso se ven reflejados en la Tabla 1.

Tabla 1.*Costo del servicio eléctrico en Lucarvel*

			TARIFAS ENERGÍA CELSIA	
			Valor por kWh	\$ 529,25
<i>Equipo</i>	<i>Consumo equipo (kW)</i>	<i>Tiempo diario de operación (h)</i>	<i>Consumo mensual (kWh)</i>	<i>Costo del servicio (COP)</i>
Blower	0,75	24	540	\$ 285.795,00
Bomba 1	0,75	0,5	11,25	\$ 5.954,06
Bomba 2	0,75	1,7	38,25	\$ 20.243,81
Bomba 3	0,75	3,0	67,5	\$ 35.724,38
			TOTAL	\$ 347.717,25

Nota. Tabla de gastos asociados al consumo de energía eléctrica en el proceso de cultivo de tilapias.

Por otro lado, debido a que el recambio de agua se realiza con recursos del lago, no genera grandes costos en el servicio del acueducto; sin embargo, la empresa tiene previsto utilizar el lago para expandir su capacidad de producción y realizar un cultivo semi intensivo con jaulas en el lago. De ser así el recambio de agua se realizaría con agua proveniente del acueducto, por lo cual se realizará un estimado de costos del servicio de acueducto para suplir las necesidades del recambio.

Según la ubicación de la empresa Lucarvel las tarifas del servicio de acueducto se ajustan a la del municipio más cercano, en este caso Palmira, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2.*Costo del servicio de acueducto en el municipio de Palmira*

MUNICIPIO DE PLAMIRA ACUEDUCTO			
<i>Estrato</i>	<i>C. Fijo (COP)</i>	<i>0-16 m³ (\$/m³)</i>	<i>> 16 m³ (\$/m³)</i>
Estrato 1	\$ 3.533,51	\$ 1.173,68	2347,35
Estrato 2	\$ 6.643,00	\$ 2.206,51	2347,35
Estrato 3	\$ 7.067,03	\$ 2.347,35	2347,35

Tabla 2. (Continuación)

Estrato	C. Fijo (COP)	Consumo m ³ (\$/m ³)	Subsidios
Estrato 4	\$ 7.067,03	\$ 2.347,35	E1: 50,00%
Estrato 5	\$ 10.600,54	\$ 3.521,03	E2: 6,00%
Estrato 6	\$ 11.307,24	\$ 3.755,76	E3: 0,00%
Comercial	\$ 10.600,54	\$ 3.521,03	Aportes solidarios
Industrial	\$ 9.187,13	\$ 3.051,56	E5: 50,00%
Oficial y especial	\$ 7.067,03	\$ 2.347,35	E6: 60,00%
Temporal	\$ 11.307,24	\$ 3.755,76	Com: 50,00% Ind: 30,00%

Nota. Tabla de costos del servicio de acueducto en Palmira, Valle del Cauca. Tomado de: EMCALI, “Tarifas primer semestre de 2021”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/vxhJN89> [Acceso 18 mar, 2021]

Vale la pena recalcar que el proceso de recambio se realiza con la mitad del volumen de llenado de cada uno de los estanques; de esta forma se procede a hacer el cálculo respectivo con las tarifas del servicio de acueducto del año 2021.

Teniendo en cuenta los volúmenes de cada uno de los estanques se realizan los cálculos respectivos para la estimación de costos del servicio de acueducto, ya que de seguir utilizando los métodos de aireación y desgasificación actuales y contemplando los planes futuros de la empresa estos gastos deben ser valorados en el diagnóstico del proceso.

Para realizar el cálculo de los costos relacionados al servicio de agua se tiene en cuenta la Ecuación 2.

Ecuación 2.

Costo de agua

$$\text{Costo agua} = \text{Volumen recambio (m}^3\text{)} * \text{Número de tanques} * 30 \text{ días} \\ * \text{Tarifa de acueducto} \left(\frac{\text{COP}}{\text{m}^3} \right)$$

El modelo de cálculo para determinar el costo de operación de los tanques de 5 m se puede observar a continuación.

$$\text{Costo agua} = 9,82 \text{ m}^3 * 5 * 30 \text{ días} * 2347 \frac{\text{COP}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Costo agua} = 3.456.758 \text{ COP}$$

Los resultados de los costos asociados al agua para todos los tanques se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3.

Gastos de agua del servicio de acueducto en los recambios de agua

Valor acueducto (\$/m³)	\$ 2.347
---	----------

<i>D (m)</i>	<i>Cantidad de tanques</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Volumen de recambio (m³)</i>	<i>Recambios mensuales (diarios)</i>	<i>Valor total (Recambios diarios)</i>
5	5	19,63	9,82	30	\$ 3.456.758,00
9	6	63,62	31,81	30	\$ 13.439.876,00
12	4	113,10	56,55	30	\$ 15.928.742,00
TOTAL MES					\$ 32.825.376,00

Nota. Tabla de gastos asociados al uso de agua de acueducto en los recambios de agua en la empresa Lucarvel.

Con base en la información presentada en las anteriores tablas los costos de servicios públicos para la empresa pueden llegar a aproximadamente a 33 millones de pesos.

2.3 El agua en el proceso del cultivo de tilapias

Como diagnóstico del agua de cultivo en la empresa Lucarvel se determinan los valores de los parámetros que influyen en el crecimiento y desarrollo del pez, entre estos parámetros se encuentra la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno disuelto, la concentración de amonio y la concentración de dióxido de carbono.

Las muestras se tomaron en el tanque de 5 metros de diámetro.

2.3.1 Temperatura

Las mediciones de temperatura se realizaron mediante un sensor digital de marca TEKCOPLUS (Figura 12) obtenido por la empresa al iniciar el proceso del cultivo.

Figura 12.

Medidor digital TEKCOPLUS



Nota. Sensor digital TEKCOPLUS. Tomado de: Amazon, “Medidor digital portátil con sensor de oxígeno disuelto”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/hb2EQPw> [Acceso 19 may, 2021]

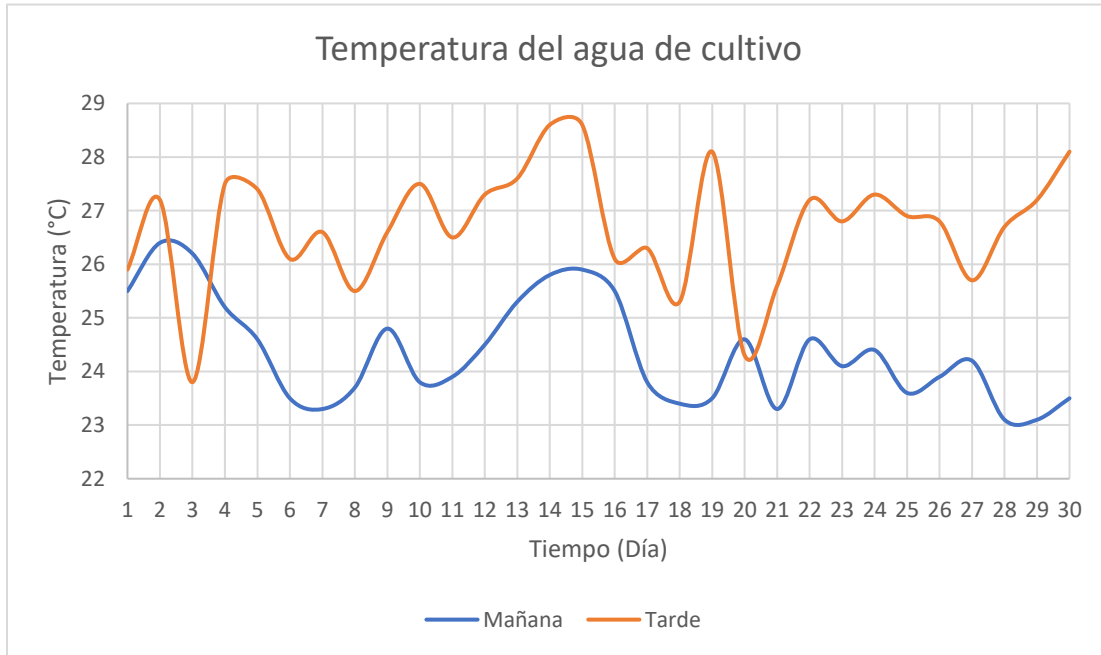
El sensor de medición se compone de una sonda la cual se introduce en los estanques; esta sonda envía la medición y es visible en la pantalla del dispositivo.

Para conocer el comportamiento de esta variable a lo largo del día se tomaron dos mediciones diarias en el transcurso del mes de abril del año 2021, una a las ocho de la mañana y otra a las cuatro de la tarde teniendo en cuenta la jornada laboral del trabajador.

Como se observa en la Figura 13, los resultados de las mediciones arrojaron que en horas de la tarde la temperatura es mayor posiblemente debido a los efectos de la radiación solar; mientras que en la mañana las temperaturas son más bajas.

Figura 13.

Temperatura en el agua de cultivo



Nota. Temperatura en el agua de cultivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

2.3.2 pH

Las mediciones del pH se realizaron con un kit de análisis de agua.

El kit es de la marca API (Figura 14), consiste en diversos reactivos para medir distintas propiedades del agua y está diseñado para procesos de acuicultura, la desventaja de este kit es la cantidad limitada de muestras que se pueden tomar; por lo tanto, para este parámetro se realizó la medición una vez diaria durante todo el mes de abril del año 2021.

Figura 14.

Kit de medición de propiedades del agua.



Nota. Kit de medición de parámetros en el agua. Tomado de: Mercadolibre Colombia, “Freshwater master test kit”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/kb2IVD8> [Acceso 19 may, 2021]

Figura 15.

pH en el agua de cultivo



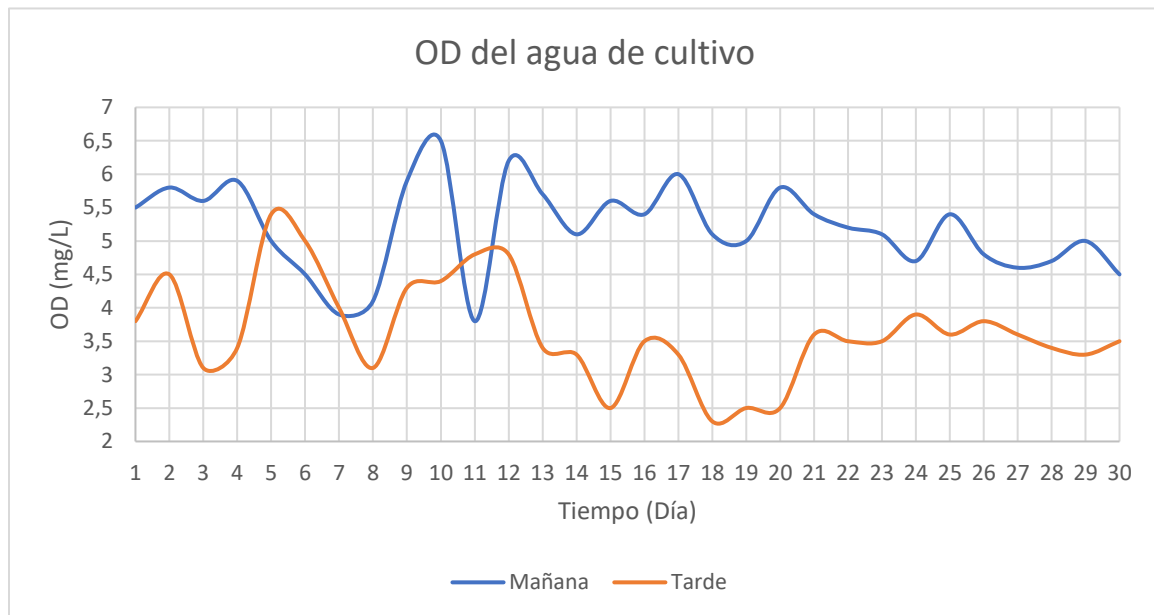
Nota. pH en el agua de cultivo de tilapias de la empresa Lucarvel.

2.3.3 Concentración de oxígeno disuelto

La concentración del oxígeno disuelto fue medida con el mismo instrumento que se usó para la temperatura, por lo tanto, las mediciones se realizaron la misma cantidad de veces al día en el mismo horario (Figura 16).

Figura 16.

Oxígeno disuelto en el agua de cultivo



Nota. Concentración de oxígeno disuelto en el agua de cultivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

Debido a que las muestras de temperatura y oxígeno disuelto se tomaron al tiempo, se puede establecer la relación de que a mayor temperatura la cantidad de oxígeno disuelto disminuye, es decir, la transferencia de oxígeno se ve favorecida a bajas temperaturas.

2.3.4 Concentración de amonio

La concentración de amonio fue medida con el mismo kit de medición utilizado para el pH; se tomaron muestras diarias a lo largo del mes de abril de 2021 (Figura 17).

Figura 17

Amonio en el agua de cultivo



Nota. Concentración de amonio en el agua de cultivo de tilapias de la empresa Lucarvel.

Para el control de esta variable la empresa utiliza la técnica biofloc, la cual fue explicada a principios del presente capítulo.

2.3.5 Concentración del dióxido de carbono

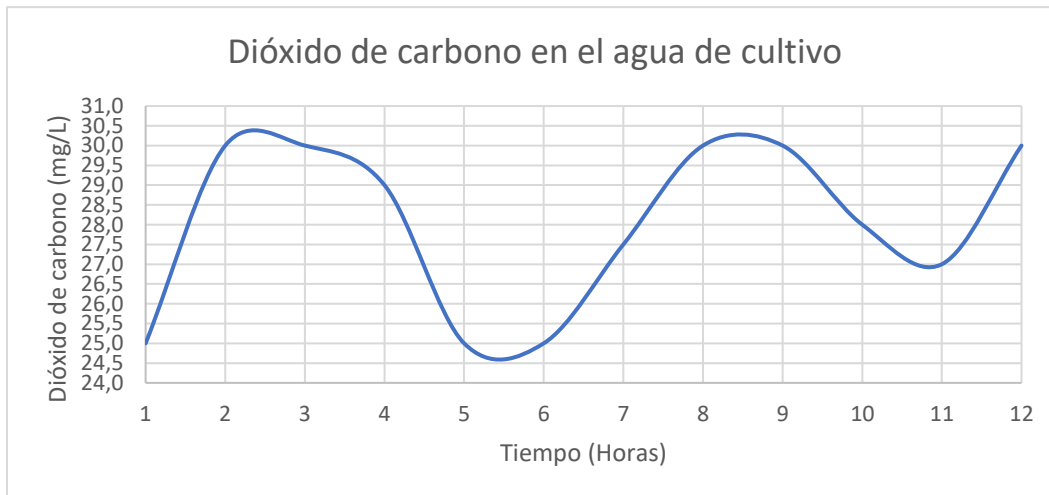
Las mediciones del dióxido de carbono no eran tenidas en cuenta por la empresa, por lo tanto, no contaban con un equipo que las realizara. Para determinar el punto de partida de la concentración del dióxido de carbono en el agua se adquirió un equipo de titulación de la marca HANNA Instruments.

El equipo fue adquirido por parte de los investigadores y debido a las muestras limitadas se estableció un periodo de tiempo específico para la toma de muestras.

El trabajador de la empresa no cuenta con los conocimientos necesarios para realizar la titulación del agua, por lo tanto, la empresa Lucarvel otorgó permiso a los investigadores por un lapso de 12 horas, comprendidas entre las 6 de la tarde y las 6 de la mañana, para la toma de muestras de este parámetro; los resultados obtenidos se muestran en la Figura 18.

Figura 18.

Dióxido de carbono en el agua de cultivo



Nota. Concentración de dióxido de carbono en el agua de cultivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

2.3.6 Biofloc

Figura 19.

Biofloc en el agua de cultivo



Nota. Biofloc en el agua de cultivo.

Para realizar el muestreo de la técnica biofloc se utiliza una botella plástica en donde se realiza el proceso de sedimentación de la materia orgánica presente en el agua. Las muestras se toman diariamente al comienzo de la jornada laboral del trabajador.

Dependiendo de la cantidad de biomasa sedimentada se determina si el biofloc está en los valores requeridos para el volumen de agua de cultivo.

2.4 Cumplimiento de los parámetros del agua en la empresa Lucarvel

Teniendo en cuenta las variables mencionadas en los anteriores capítulos y los resultados de las diferentes muestras se establece una relación de los parámetros con el fin de determinar si la empresa está dentro de los rangos permitidos para el cultivo de tilapias, esta relación se establece en la Tabla 4.

Vale la pena aclarar que los valores tenidos en cuenta para hacer la comparación fueron los obtenidos en el mes de abril de 2021, y se tomaron como rango para tener en cuenta todos los datos, máximos y mínimos.

Tabla 4.

Diagnóstico del agua de cultivo en la empresa Lucarvel

<i>Parámetro</i>	<i>Valor actual</i>	<i>Rangos</i>	<i>Efecto</i>	<i>Ref.</i>
Temperatura (°C)	23,1-28,6	15,0-24,0 25,0-30,0	Tolerable por la tilapia Óptimo	[14]
pH	5,0-7,6	< 5,0 5,0-6,4 6,5-8,0	Crecimiento lento Tolerable por la tilapia Óptimo	[6], [28]
Oxígeno disuelto (mg/L)	2,3-6,5	0,3-2,0 3,0-4,0 > 4,5	Letal a exposiciones prolongadas Crecimiento lento Óptimo	[15]
Amonio (mg/L)	0,2-8,0	> 2,0 0,6-2,0 < 0,1	Letal a exposiciones prolongadas Tolerable por la tilapia Óptimo	[15]
Dióxido de carbono (mg/L)	25,0-30,0	> 40,0 20,0-40,0 < 20,0	Letal Causa letargia e inapetencia Óptimo	[15], [28]

Nota. Diagnóstico del agua de cultivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

Los parámetros que están cercanos o en los valores de letalidad son la concentración de oxígeno disuelto, la concentración de amonio y la concentración de dióxido de carbono; si bien el pH no tiene un óptimo valor, no genera un ambiente letal para el pez.

Como se puede observar en la Figura 17 la concentración de amonio se eleva aproximadamente cada 15 días, en estos periodos se realiza la modificación de la técnica biofloc; la mayor parte del tiempo este parámetro se encuentra en los valores normales.

La concentración de oxígeno disuelto es tratada actualmente mediante el blower anteriormente descrito, sin embargo, existen pequeños lapsos en donde el blower no tiene la capacidad de mantener el agua en los valores lejanos a la letalidad.

La concentración de dióxido de carbono es la más crítica para el proceso debido a que no hay métodos que controlen esta variable en el cultivo de tilapias, situación que se puede observar en los altos valores que arrojan las muestras.

3. MATRIZ DE SELECCIÓN

En el siguiente capítulo se selecciona una alternativa para el proceso de aireación y desgasificación del agua en el cultivo de tilapias mediante una matriz de selección; en primer lugar, se seleccionará la técnica para la toma de decisiones, luego se definen los criterios de evaluación y finalmente se realiza la matriz de selección.

3.1 Técnicas para la toma de decisión multicriterio

Para realizar la selección de la alternativa que más se ajuste a los requerimientos de la empresa se procede a realizar las descripciones de las posibles alternativas de tomas de decisiones.

3.1.1 Método PUGH

El método PUGH es una matriz que permite la comparación de una serie de alternativas de diseño que conducen a la alternativa que cumpla con el mayor número de criterios. Se utiliza para seleccionar la mejor opción frente a una determinada situación logrando distinguir los puntos fuertes y limitaciones de las alternativas. [29]

Esta matriz se realiza con los criterios en la primera columna y se evalúan en todas las alternativas de diseño con +1, -1 o 0 dependiendo si el cumplimiento del criterio es superior, inferior o igual al criterio base. [30]

3.1.2 Método ELECTRE

El método ELECTRE organiza las alternativas de la mejor a la peor opción tomando en cuenta las preferencias del decisor. La base de este método es una relación de sobre clasificación, en donde se maneja la concordancia y la discordancia. [31]

La concordancia cuantifica hasta qué punto la opción A es mejor que la opción B; la discordancia cuantifica hasta qué punto no existen atributos para que B sea mejor que A, teniendo en cuenta los criterios establecidos. [31]

3.1.3 Método de sumas ponderadas

En el método de las sumas ponderadas todos los criterios deben tener un rango de valoración numérica; a cada criterio se le asigna un peso que va de mayor a menor

dependiendo la importancia del criterio en la selección. Los pesos normalizados deben sumar 1. [32]

Al finalizar la clasificación de los criterios se realiza el cálculo de cada alternativa con la siguiente ecuación.

Ecuación 3.

Ecuación del método sumas ponderadas

$$M_i = \sum a_{ij} * w_j$$

Donde M_i = Calificación ponderada de la alternativa i

a_{ij} = Calificación de la alternativa i en el criterio j

w_j = Peso de ponderación del criterio j

3.1.4 Análisis de sensibilidad

Se basa en procedimientos estadísticos que evalúan como las variaciones de entrada afectan a los resultados finales. Se emplea para determinar la alternativa que mejor probabilidad tiene de cumplir unos determinados requerimientos. [33]

3.1.5 Proceso analítico jerárquico

Se disponen los criterios en una jerarquía en donde el más alto es el criterio objetivo seguido de los otros criterios. Se realiza una comparación por pares de los criterios para obtener su importancia para después comparar cada criterio con cada alternativa y obtener la mejor alternativa para el proceso. [33]

3.2 Elección de la técnica de decisión multicriterio

De acuerdo con la comparación de las técnicas de selección multicriterio no se encuentran ventajas significativas entre una y otra, la importancia de selección radica en los criterios. Es por esta razón que en el presente documento no se va a realizar la selección de la técnica de acuerdo con sus ventajas sino a la facilidad de manejo.

El método seleccionado es el de las sumas ponderadas.

3.3 Criterios de evaluación

Para la selección de la alternativa es importante cumplir con los objetivos de la empresa, estos se basan en realizar un trabajo de calidad, seguro, de bajo costo y amigable con el ambiente. De acuerdo con estos objetivos se realiza una propuesta de 9 criterios de evaluación para cada una de las alternativas, estos criterios son:

1. Espacio utilizado
2. Consumo energético
3. Mantenimiento
4. Inversión
5. Eficiencia en eliminación de dióxido de carbono
6. Seguridad
7. Tiempo de proceso
8. Instalación y movimiento
9. Equipos necesarios

Vale la pena aclarar que cada uno de los criterios mencionados anteriormente tiene un peso distinto para la empresa, por lo tanto, con la ayuda de los directivos se establecieron los pesos para cada uno de los criterios.

En primer lugar, los criterios fueron comparados por pares según la clasificación presente en la Tabla 5.

Tabla 5.

Valores de clasificación de criterios

Valor	Descripción
20	Mucho más importante
15	Más importante
10	Igual
5	Menos importante
1	Mucho menos importante

Nota. Valores para la clasificación de los criterios de evaluación de alternativas.

Con los valores definidos se procede a realizar la comparación de criterios por pares.

Tabla 6.

Comparación de criterios por pares

		Número de criterio									SUMA	PESO
		1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Número de criterio	1		5	15	5	5	10	10	5	5	60	0,085
	2	20		15	10	10	10	15	10	10	100	0,142
	3	15	5		10	10	10	10	10	5	75	0,106
	4	15	10	10		10	10	15	15	10	95	0,135
	5	15	10	15	10		15	15	20	10	110	0,156
	6	10	5	10	5	10		10	10	10	70	0,099
	7	5	1	5	5	5	10		5	5	41	0,058
	8	10	5	10	10	5	10	15		10	75	0,106
	9	15	5	10	10	5	10	15	10		80	0,113
TOTAL											706	1,000

Nota. Comparación de criterios por pares para determinar el peso de los criterios.

El peso de los criterios se determinó realizando la suma de cada comparación y dividiéndola sobre la suma total. Como se puede observar en la Tabla 6 el criterio más importante es la eficiencia de eliminación del dióxido de carbono y el menos importante es el tiempo que se demora el proceso.

La jerarquía de los criterios quedó definida en la Tabla 7.

Tabla 7.

Jerarquía de los criterios de selección

CRITERIO	PESO
Eficiencia de eliminación de CO ₂	0,156
Consumo energético	0,142

Tabla 7 (Continuación)

Inversión	0,135
Equipos necesarios	0,113
Instalación y movimiento	0,106
Mantenimiento	0,106
Seguridad	0,099
Espacio utilizado	0,085
Tiempo de proceso	0,058

Nota. Jerarquía de los criterios de selección ubicados del más importante al menos importante.

El método de sumas ponderadas requiere que cada criterio sea evaluado numéricamente, para ello se realiza la división de cada criterio en 5 opciones numéricas que funcionen como guía para la evaluación de alternativas, en donde el número 5 representa la mejor condición para el proceso y el número 1 la condición menos favorable (Tabla 8).

Una vez se tenga la división de criterios se evalúa cada alternativa con respecto a cada uno de ellos y se aplica la ecuación del método de sumas ponderadas vista en la sección 3.1. La alternativa de diseño que mejor valoración obtenga va a ser la escogida y se procederá a realizar el diseño del equipo.

Tabla 8.

Cuantificación de los criterios de evaluación

CRITERIO		DESCRIPCIÓN	CRITERIO		DESCRIPCIÓN
EFICIENCIA DE ELIMINACIÓN DE CO ₂	1	Muy bajo	MANTENIMIENTO	1	Muy difícil
	2	Bajo		2	Difícil
	3	Moderado		3	Moderado
	4	Alto		4	Fácil
	5	Muy alto		5	Muy fácil
CONSUMO ENERGÉTICO	1	Muy alto	SEGURIDAD	1	Muy poco seguro
	2	Alto		2	Poco seguro
	3	Moderado		3	Moderadamente seguro
	4	Bajo		4	Seguro
	5	Muy bajo		5	Muy seguro

Tabla 8 (Continuación)

INVERSIÓN	1	Muy alta	ESPACIO UTILIZADO	1	Muy alto
	2	Alta		2	Alto
	3	Moderada		3	Moderado
	4	Baja		4	Bajo
	5	Muy baja		5	Muy bajo
EQUIPOS NECESARIOS	1	>6	TIEMPO DE PROCESO	1	Muy alto
	2	5		2	Alto
	3	4		3	Moderado
	4	3		4	Bajo
	5	<=2		5	Muy bajo
INSTALACIÓN Y MOVIMIENTO	1	Muy difícil			
	2	Difícil			
	3	Moderado			
	4	Fácil			
	5	Muy fácil			

Nota. Cuantificación de los criterios de evaluación de alternativas.

3.4 Elaboración de la matriz de selección

Una vez se realizó la selección y cuantificación de todos los criterios, se realiza la matriz de selección. En esta parte del capítulo se comparan las alternativas de diseño con los criterios seleccionados. Vale la pena recordar las 5 alternativas de diseño.

1. Torre empaquetada a contracorriente
2. Torre empaquetada de flujo transversal
3. Torre de bandejas
4. Torre de pulverización
5. Métodos químicos

Tabla 9.

Matriz de selección: Método sumas ponderadas

ALTERNATIVA	CRITERIO									SUMA PONDERADA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Torre empaquetada a contracorriente	4	4	3	3	4	4	3	3	4	3,5949

Tabla 9 (Continuación)

Torre empaquetada de flujo transversal	4	4	2	3	4	4	3	3	4	3,4887
Torre de bandejas	4	4	4	4	2	4	3	3	4	3,5241
Torre de pulverización	4	3	4	3	3	4	4	4	4	3,5680
Métodos químicos	2	2	1	3	4	3	3	3	2	2,6034
w	0,085	0,142	0,106	0,135	0,156	0,099	0,058	0,106	0,113	

Nota. Matriz de selección por medio del método de sumas ponderadas.

Como se puede observar en la Tabla 9 la alternativa que mejor se ajusta a los requerimientos de la empresa es la torre empaquetada a contracorriente; la cual obtuvo el mejor puntaje con el método de sumas ponderadas.

4. TORRE EMPACADA A CONTRACORRIENTE

En el presente capítulo se realiza el diseño matemático de la torre de aireación y desgasificación para el tanque de 5 m de diámetro de acuerdo con la alternativa seleccionada en el anterior capítulo, para ello se tienen en cuenta criterios ya establecidos en la bibliografía para el diseño de una torre empacada a contracorriente.

4.1 Funcionamiento

Las torres empacadas se usan para el contacto continuo a contracorriente de un gas y un líquido; generalmente utilizados en procesos de destilación y absorción. [34]

El gas entra por la parte inferior de la columna y va subiendo a través de las aberturas del material del empaque, así se pone en contacto con el líquido descendente que fluye a través de las mismas aberturas, generando una gran superficie de contacto entre las dos fases. [35]

4.2 Empaques

Los empaques son sólidos que rellenan las columnas y tienen como objetivo aumentar el contacto entre la fase gas y la fase líquida, para obtener una mayor área de contacto con una mínima resistencia al flujo y de esta forma obtener una mayor transferencia de masa. [36]

Los empaques se pueden clasificar de acuerdo con la forma de distribución dentro de las columnas, entre estos se encuentran los empaques al azar y los empaques estructurados.

4.2.1 *Empaques al azar*

Son aquellos que son arrojados en la torre durante la instalación y por lo tanto quedan distribuidos de forma aleatoria.

Antiguamente eran utilizados materiales de fácil obtención como la arena, piedras o pedazos de coque; sin embargo, estos materiales no presentaban buenas propiedades que garantizaran la fluidez del proceso. [34]

Los empaques aleatorios pueden construirse de metal, plástico, cerámica u otros materiales; todo dependerá del tipo de sustancia que se está manejando y los costos de los materiales. [37] En la Figura 20 se observan los tipos de empaque al azar.

Figura 20.

Tipos de empaques al azar



Nota. Tipos de empaques aleatorios. Tomado de Gustawater, “The ultimate guide on how to choose random packing”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/ib6XvHr> [Acceso 23 may,2021]

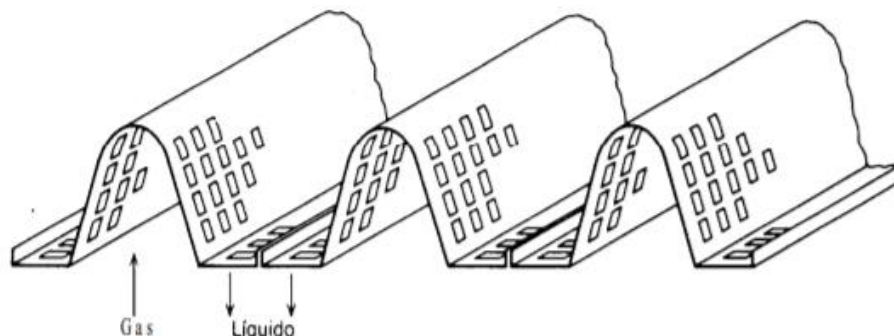
4.2.2 **Empaques estructurados**

Son empaques compuestos de una amplia gama de materiales especialmente diseñados para su uso en columnas de absorción o destilación. Generalmente

consisten en placas de metal corrugado o laminas delgadas dispuestas de manera que obligan a los fluidos a recorrer caminos obstaculizados aumentando el área de transferencia de masa. [38]

Figura 21.

Empaque estructurado



Nota. Ejemplo de empaque estructurado. Tomado de: Operaciones de transferencia de masa, “Torres empaquetadas”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/unwie6h> [Acceso 24 may,2021]

Como se puede observar en la Figura 21 un empaque estructurado posee una forma especial, de tal manera que obstaculice el paso de los fluidos; cuando los fluidos están atravesando el empaque tienen mayor contacto entre sí y, por lo tanto, la transferencia de masa aumenta.

4.2.3 Criterios para la selección del empaque

Para la elección del empaque utilizado en el proceso de aireación y desgasificación se deben tener en cuenta las características mencionadas en el libro “Operaciones de transferencia de masa” de Robert Treybal.

En primer lugar, el empaque debe proporcionar una superficie interfacial grande entre el líquido y el gas, vale la pena tener en cuenta que el área del empaque es generalmente más grande que el área interfacial entre el gas y el líquido debido a la porosidad del material que se está trabajando, esta porosidad es ocupada por el líquido y no genera área de contacto entre las fases.

Como segunda medida el empaque debe tener las características deseables del flujo del gas y el líquido; una propiedad de los empaques es el espacio vacío (ϵ), entre más grande permite más flujo. Un empaque debe permitir el paso de grandes cantidades de flujos a través de la torre, esto genera menor caída de presión y poca acumulación de fluidos.

Un empaque debe ser químicamente inerte con los fluidos que entran al proceso de aireación y desgasificación, de no ser así la naturaleza química de las sustancias involucradas se ve comprometida y afectaría al proceso.

La estructura y resistencia del empaque deben ser elevadas para manejar y soportar los flujos del proceso y el costo debe ser bajo.

4.3 Selección del empaque

Para realizar la elección del empaque se trabajó en conjunto con representantes de la empresa Lucarvel, este proceso debe tener en cuenta el sistema que se va a implementar, las sustancias, las condiciones del proceso y los factores económicos.

En el proceso de selección se va a determinar el tipo del empaque, el empaque, el material de construcción y el tamaño del empaque.

4.3.1 Tipo de empaque

La elección del tipo de empaque se realiza por medio de la evaluación de los empaques estructurados y al azar en base a su costo relativo, la caída de presión, la eficiencia en la transferencia de masa y la capacidad de almacenar el flujo de vapor.

Tabla 10.

Características de los tipos de empaques

<i>Criterio</i>	<i>Tipo de empaque</i>	
	<i>Al azar</i>	<i>Estructurado</i>
Costo relativo	Bajo	Alto
Caída de presión	Moderada	Baja
Eficiencia de transferencia de masa	Alta	Muy alta
Capacidad del vapor	Alta	Alta

Nota. Características de los tipos de empaques.

Si bien los dos tipos de empaques cumplen con el mismo objetivo existen parámetros para determinar cuál de los dos tipos de empaques es el más conveniente.

La empresa Lucarvel es una empresa que actualmente no cuenta con elevados recursos económicos, la inversión para poner en funcionamiento el cultivo de tilapias no contemplaba un sistema de desgasificación, por lo tanto, los costos son primordiales para la elección del empaque.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y la información presentada en la Tabla 10 se determina que el empaque para el proceso de aireación y desgasificación ideal para el proceso es un empaque al azar debido a su costo bajo y la alta eficiencia en la transferencia de masa.

4.3.2 Material de construcción

Los empaques al azar son construidos de diversos materiales; cada material tiene una aplicación en específico en los procesos que se realizan con empaques (Tabla 11), así mismo poseen diferentes características que influyen en la transferencia de masa.

Actualmente se encuentran empaques de plástico, cerámica, acero al carbón, acero inoxidable, PFA y PVC.

Tabla 11.

Aplicación de los diferentes materiales de los empaques

Material	Aplicación
Polipropileno	Sistemas acuosos hasta 100 °C
Acero al carbón	Sistemas de hidrocarburos no corrosivos
Cerámica	Sistemas de absorción de ácidos nítrico y sulfúrico
Acero inoxidable	Sistemas con hidrocarburos
PFA	Sistemas acuosos corrosivos hasta 150 °C
PVC	Sistemas acuosos corrosivos hasta 90°C

Nota. Aplicación de los diferentes materiales en empaques al azar.

Tomado de “HAT International”, “Random Packing”, [En línea].

Disponible: <https://cutt.ly/Znz0UB0> [Acceso 24 may, 2021]

El sistema tratado en la empresa Lucarvel consiste en un sistema acuoso no corrosivo manejado a temperatura ambiente, por lo cual, los empaques de polipropileno son los adecuados para el proceso.

4.3.3 *Tamaño del empaque*

En el artículo “Selection of Packing Material for Gas Absorption” de Melaaen Morten se determina el tamaño del empaque para la extracción de dióxido de carbono de una corriente gaseosa; en este concluyen que a mayor área superficial del empaque hay una mejor eficiencia en la transferencia de masa.

El área superficial va aumentando a medida que el tamaño de los empaques disminuye, por lo tanto, se debe escoger el menor tamaño posible para obtener una alta eficiencia en el proceso.

Se ha establecido también una relación entre el diámetro de la columna y el tamaño del empaque. El tamaño del empaque tiene influencia en el proceso ya que si el relleno es muy grande y la columna pequeña puede provocar una mala distribución de líquido y una eficiencia de transferencia de masa baja. [39]

Tabla 12.

Tamaños recomendados de empaques

<i>Diámetro de columna (m)</i>	<i>Tamaño de empaque (mm)</i>
< 0,3	< 25
0,3 - 0,9	25 a 38
> 0,9	50 a 75

Nota. Tamaños recomendados de empaques en columnas. Tomado de “Equipment Design Lecture”, “Separation columns”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/jnxq3U6> [Acceso 25 may, 2021]

Como medida general los tamaños de empaque de 25 mm o mayores se utilizan para un flujo de gas de 0,25 m³/s y los de 50 mm o mayores para un flujo de gas de 1 m³/s. [34]

En la Tabla 12 se observa el tamaño recomendado de los empaques dependiendo el diámetro de la torre, como ya se había mencionado con anterioridad a menor tamaño de empaque mayor beneficio para el proceso y el caudal de aire es menor a 0,25 m³/s, por lo tanto, el tamaño adecuado es 25 mm.

4.3.4 Empaque

El tipo de empaque utilizado en el proceso de desgasificación y aireación debe poseer una alta eficiencia de transferencia de masa, un costo relativo bajo y disponibilidad en el territorio colombiano.

Inicialmente se realiza la descripción de los empaques al azar más utilizados en la industria, específicamente en los procesos de absorción. Esta descripción se encuentra en la Tabla 13.

Tabla 13

Descripción de algunos empaques al azar

<i>Empaque</i>	<i>Descripción</i>
Anillos Raschig	Es el anillo más antiguo, es el más económico por costo unitario, pero no tiene alta eficiencia. Está disponible en una amplia variedad de materiales. Es estructuralmente muy sólido y los tamaños más grandes se apilan a mano. Produce un empuje lateral en la torre.
Sillas de Berl	Son más eficientes que los anillos Raschig, tienen un costo más elevado. Este tipo de anillos promueven la canalización en menor medida que los anillos Raschig. Son frágiles.
Sillas Intalox y otros tipos de sillas	Es uno de los empaques más eficientes, pero son muy costosos; tienen poca tendencia para bloquear áreas de la cama. Posee una cama uniforme y aireada, presenta valores de HTU más bajos, por lo tanto, una menor altura de la torre. Al igual que las sillas de Berl son frágiles.

Tabla 13 (Continuación)

Anillos Pall	Poseen una caída de presión baja, tienen valores de HTU bajos. Tienen la ventaja de tener una distribución de líquidos uniforme y alta capacidad de carga. Genera empuje lateral en la columna. Se encuentran disponibles en metal, plástico y cerámica.
Hy-Pak	Altas eficiencias, bajas caídas de presión, recomendados para la destilación.
Anillos de reducción	No existen datos de rendimiento disponibles, pero presentan un alto rendimiento, la caída de presión es moderada.
Anillos de partición cruzada	Principalmente se coloca una capa sobre el soporte del empaque y encima varios empaques más pequeños, caída de presión relativamente baja, no presenta empuje lateral.
Tellerette	Disponible en plástico, poseen bajas caídas de presión y bajos valores de HTU. Son livianos.

Nota. Descripción de algunos empaques al azar. Tomado de “Applied process design for chemical and petrochemical plants”, “Packed towers”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/rnwD89S> [Acceso 24 may,2021]

Una vez con los diferentes tipos de empaques definidos se realiza una evaluación respecto a los usos que se les da en la industria, como se observa en la Tabla 14.

Tabla 14*Usos de los empaques al azar*

<i>Empaque</i>	<i>Uso</i>
Anillos Raschig	Industrias petrolíferas, química, gas de hulla y protección medio ambiental.
Sillas de Berl	Columnas de secado, columnas de absorción, torres de enfriamiento en la industria química, industria metalúrgica y la producción de oxígeno.
Sillas Intalox	Destilación, regeneración de solventes y sistemas de desorción.

Tabla 14 (Continuación)

Anillos Pall	Absorción de alcanolamina, separación de gases ácidos, separadores de carbonato de potasio, extracción de líquidos en compuestos sulfurosos, deserción (stripping) de gases.
Anillos de reducción	Destilación al vacío, sistemas de desulfuración, separación de etilbenceno, sistemas de isooctano-tolueno.
Anillos de partición cruzada	Torres de secado, refrigeración y lavado en las industrias petroquímicas, química, metalúrgica y generación de oxígeno. Usado en procesos con solventes orgánicos.
Tellerette	Torres de lavado y refinación.

Nota. Usos comunes de los diferentes tipos de empaques en la industria. Tomado de: Universidad Autónoma de Yucatán, “Tipos de empaques para columnas”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/xnxxZID> [Acceso 24 may, 2021]

Con base en la información presentada en la Tabla 14 los anillos Raschig y los anillos Pall cumplen con el objetivo del proceso.

Al realizar un estudio de transferencia de masa con los anillos Raschig se encuentra que la superficie interna es ineficaz debido a que genera una canalización del líquido y del gas, generada por las áreas desperdiciadas. [40]

Cuando los anillos Pall son comparados con los anillos Raschig se determina un incremento de la eficiencia de alrededor 45 % y de hasta por lo menos el 20% cuando se compara con empaques de tipo silla. [40]

En Colombia los anillos Pall son fabricados por Cerfibras, Aquaintegral, Aquaservicios, FiltraH2O, Solostocks y Biolam y pueden ser importados desde China o Estados Unidos. En cuanto a los anillos Raschig no existen fabricantes en Colombia, solo se pueden obtener por medio de la importación desde China o Estados Unidos.

Tomando en consideración los datos anteriormente expuestos se seleccionan los anillos Pall como empaque para el diseño del proceso.

4.4 Condiciones de operación

El equipo va a operar a las condiciones ambientales de la finca en donde se ubica la empresa Lucarvel. La temperatura y la presión son importantes para calcular las propiedades de las sustancias y predecir su comportamiento en el proceso.

4.4.1 Presión

La presión atmosférica depende de la altitud del lugar en cuestión. La Ecuación 4 se utiliza para calcular la presión atmosférica de un lugar determinado dependiendo de la altitud de este.

Ecuación 4.

Determinación de la presión atmosférica

$$P [Pa] = 101325 * (1 - 2,25577 * 10^{-5} * H[m])^{5,25588}$$

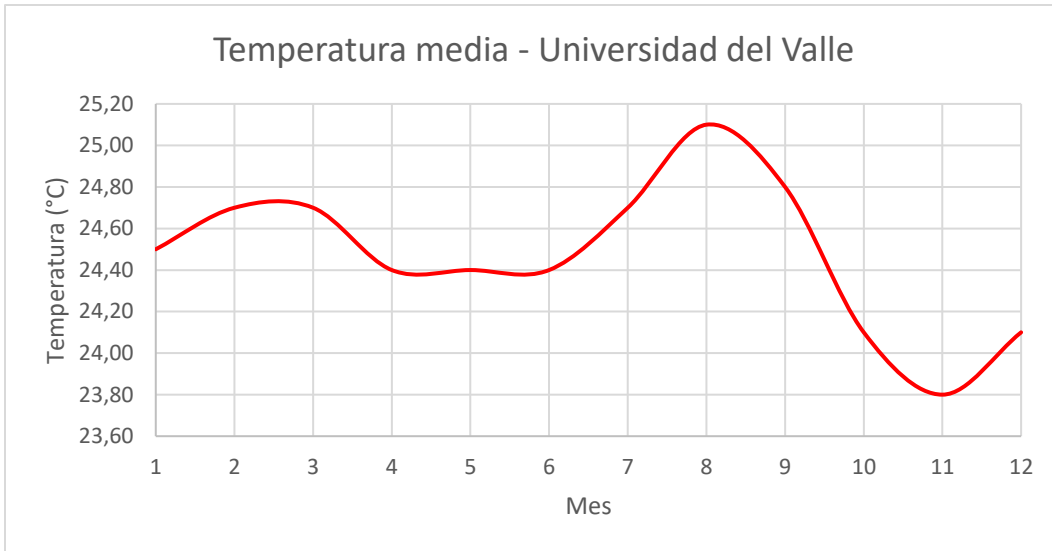
La empresa se encuentra ubicada a una altitud de 1018 m sobre el nivel del mar; al aplicar la Ecuación 4 se determina una presión de 89669 Pa que son equivalentes a 0,89 atm.

4.4.2 Temperatura

Los datos de temperatura ambiente fueron obtenidos del atlas interactivo del IDEAM para la región de Cali, Valle del Cauca, más específicamente de la estación de medición ubicada en la universidad del Valle (Figura 22).

Figura 22.

Temperatura ambiente



Nota. Temperatura media mensual medida en la estación del IDEAM. Tomado de: IDEAM, “Atlas climatológico”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/wncL1vz> [Acceso 3 jun, 2021]

Generalmente al realizar el diseño de un equipo se tiene en cuenta la peor condición para el proceso.

Un cultivo de tilapias tiene condiciones variables, sin embargo, para el diseño del equipo se tiene en cuenta un proceso isotérmico.

Como se puede observar en la Figura 13 y la Figura 16 el oxígeno disuelto disminuye a altas temperaturas; siendo así, la peor condición es la temperatura promedio del mes de agosto (25,1°C), la cual se va a utilizar en el diseño de la torre empacada.

4.5 Modelo de cálculo

En esta sección se realiza el diseño de la torre de aireación y desgasificación teniendo en cuenta las condiciones del entorno y utilizando correlaciones matemáticas; el equipo diseñado es para el tanque de 5 m de diámetro.

4.5.1 Suposiciones de diseño

Para el desarrollo del diseño del equipo se realizan suposiciones que permitan determinar cómo progresar en los cálculos y el dimensionamiento del equipo. Estas suposiciones se observan a continuación.

- Un cultivo semi intensivo de tilapias presenta cambios en sus variables a lo largo del día, sin embargo, para el diseño en cuestión se considera un proceso isotérmico.
- El caudal de operación de la bomba se toma como 320 L/min (0,0053 m³/s) debido a que es el caudal manejado por la empresa Lucarvel en los procesos que llevan a cabo actualmente, buscando reducir la adquisición de nuevos equipos.
- La filtración del agua de cultivo no se tiene en cuenta para el diseño del proceso.
- La velocidad de generación de dióxido de carbono permanece constante a lo largo del tiempo.
- El diseño del equipo se realiza para el tanque de 5 metros de diámetro, el cual tiene aproximadamente una capacidad de 19.630 litros (19,63 m³).
- No existen pérdidas de líquido ni de vapor a lo largo del proceso.
- El nitrógeno disuelto en el agua de cultivo no se tiene en cuenta en el diseño del equipo por lo que es un parámetro controlado.

4.5.2 Condiciones iniciales

Los datos iniciales necesarios para realizar el diseño de la torre de aireación y desgasificación se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15*Condiciones iniciales*

Parámetro	Valor	Unidades
Presión (P)	0,89	atm
Temperatura de operación (Top)	298,15	K
Concentración inicial de CO ₂ (C _o)	30,00	mg/L
Densidad del aire (ρ_g)	1,18	kg/m ³
Densidad del agua (ρ_l)	997,00	kg/m ³
Viscosidad del aire	0,0185	cP
Viscosidad del agua	0,8910	cP
Masa molecular CO ₂ (M _A)	44,01	g/mol
Masa molecular aire (M _B)	28,96	g/mol
Punto de ebullición CO ₂ (T _{EbA})	194,54	K

Nota. Condiciones iniciales para el diseño de la torre de aireación y desgasificación.

4.5.3 Relación gas líquido (G/L)

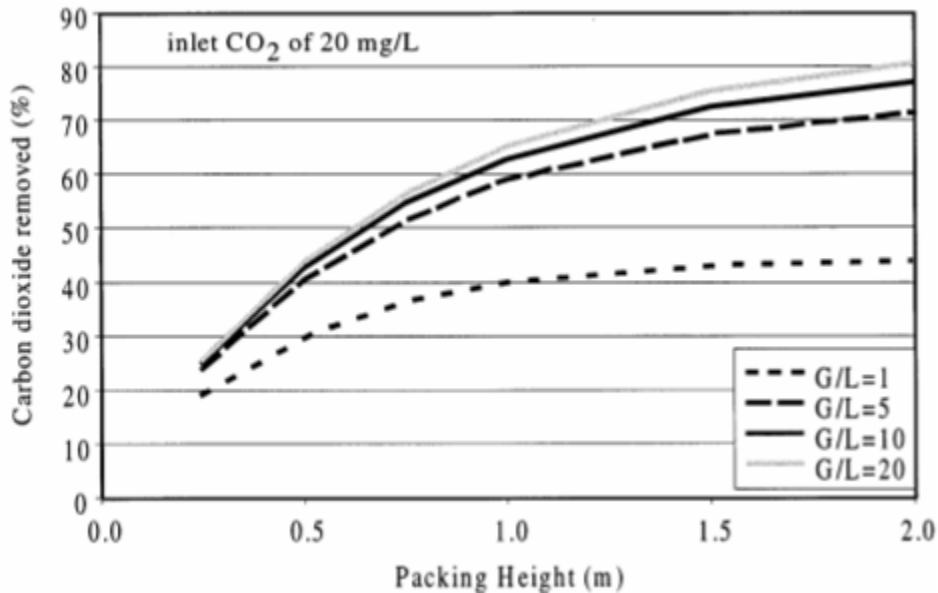
La relación gas-líquido (G/L) se obtiene de la división del flujo de aire sobre el flujo de agua.

Un estudio realizado por el Freshwater Institute determinó el cambio de concentraciones y la eficiencia de remoción de dióxido de carbono en un sistema de cultivo acuícola realizando el cambio en la relación G/L en una torre empacada.

En el estudio de sensibilidad realizado por el instituto se demuestra la dependencia de la extracción de dióxido de carbono con la relación G/L, en donde como conclusión recomiendan que la relación G/L se encuentre en el rango de 3 a 10 en un proceso acuícola.

Figura 23.

Eficiencia de remoción de dióxido de carbono



Nota. Eficiencia de remoción de dióxido de carbono en función de la relación G/L en una torre empacada. Tomado de: Aquacultural Engineering, “Oxygenation and carbon dioxide control in water reuse systems”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/znQ2SED> [Acceso 5 jun, 2020]

La Figura 23 es el resultado del estudio de sensibilidad realizado por el instituto, esta muestra que a mayor relación G/L una eficiencia de remoción determinada es alcanzada con una menor altura de empaque, disminuyendo los costos de montaje del equipo.

El dióxido de carbono tiene una concentración muy baja en el aire atmosférico; cuando pasa por la torre realiza intercambio de masa y aumenta la concentración de dióxido de carbono en el aire resultante, el aumento en la presión parcial del contaminante en el aire desfavorece la eficiencia de remoción. [41]

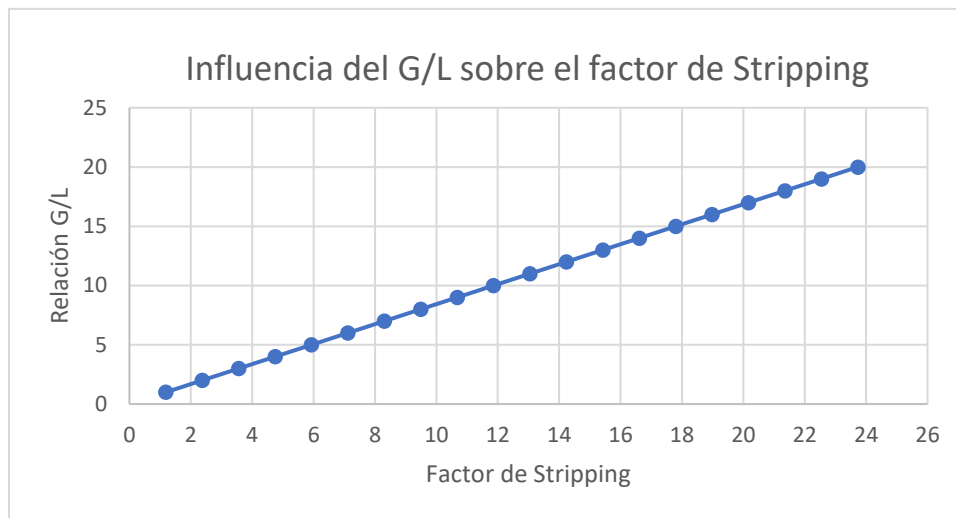
La parte experimental llevada a cabo por el Freshwater Institute indicó que con una relación G/L de 1,2 la fase gaseosa aumentó su concentración de dióxido de carbono

en 690% y se eliminó 20% menos dióxido de carbono que con una relación G/L de 10, por lo cual, los valores de G/L altos son favorables para el proceso. [41]

Adicional al estudio realizado por el Freshwater Institute, los autores del libro Water treatment principles and design, establecen un rango óptimo para el factor de stripping en las torres empacadas; no olvidemos que esta variable surge de la multiplicación de la relación G/L con la constante de Henry.

Figura 24

Influencia del G/L sobre el factor de stripping



Nota. Influencia de la relación gas-líquido sobre el factor de stripping en una torre empacada.

Como se puede observar en la Figura 24 el factor de stripping aumenta linealmente con la relación G/L. El rango óptimo del factor de stripping propuesto por los autores del libro va de 2 a 20.

Al tener en cuenta el rango de G/L recomendado por el Freshwater institute y el rango del factor de Stripping óptimo propuesto en el libro Water treatment principles and design se decide la relación de gas líquido que se encuentre en los rangos óptimos.

Como se puede observar en la Figura 23 entre mayor sea la relación G/L es más beneficioso para el proceso debido a la cantidad de empaque necesario; basándonos

en ese aspecto se evalúa la relación G/L de 10; con esa relación G/L el factor de stripping es de 11,8, es decir, se encuentra en el rango óptimo para el proceso.

Por otro lado, para el proceso de oxigenación la relación G/L se encuentra en el rango de 0,005 a 0,03 debido a la alta composición de oxígeno que tiene el aire atmosférico (21%), por dicha razón este no es un criterio para tener en cuenta a la hora de definir el G/L para el proceso.

Considerando los datos del estudio y del libro se opta por tomar una relación G/L de 10 para el proceso de aireación y desgasificación, con la ventaja de que propiciar altos volúmenes de aire es económico.

4.5.4 Concentración del efluente

De acuerdo con los datos presentados en el capítulo 2, la concentración de dióxido de carbono en un sistema de cultivo acuícola debe ser menor a 20 mg/L para propiciar un ambiente óptimo para los peces.

Siendo consecuentes con ese valor, la necesidad de la empresa radica en disminuir la concentración de dióxido de carbono en al menos 11 mg/L.

Una eficiencia de remoción alta indica una mayor altura del empaque y por lo tanto un aumento en la inversión de la empresa, sin embargo, se estableció con representantes de Lucarvel que el equipo debería disminuir adicionalmente 2 mg/L previendo cualquier cambio en las condiciones ambientales.

De esta manera se determina que la concentración de dióxido de carbono que se busca en el efluente es de 17 mg/L, esto indica un 43,3% de recuperación.

4.5.5 Velocidad de generación de dióxido de carbono

El dióxido de carbono es producido principalmente mediante el proceso de la respiración animal y vegetal; su concentración en el agua depende de la actividad biológica del cultivo. [28] La actividad biológica corresponde a los procesos metabólicos de los peces asociados a la respiración y a la fotosíntesis debido a la presencia del biofloc en el cultivo.

De acuerdo con las fuentes productoras de dióxido de carbono se determina que en horas de la noche la concentración de este parámetro aumenta debido a la fase oscura de la fotosíntesis y a la continua respiración de la especie cultivada, sin embargo, para efectos del diseño del equipo la velocidad de generación de dióxido de carbono permanece constante a lo largo del tiempo.

La velocidad de generación de dióxido de carbono puede calcularse mediante la Ecuación 5.

Ecuación 5.

Velocidad de generación de dióxido de carbono

$$V_{CO_2} = Q * (C_o - C_e)$$

$$V_{CO_2} = 320 \frac{L}{min} * \left(30 \frac{mg}{L} - 17 \frac{mg}{L} \right)$$

$$V_{CO_2} = 4160 \frac{mg}{min}$$

4.5.6 Constante de Henry

La constante de Henry puede ser expresada en términos de la concentración o presión parcial de la sustancia para la fase gas y la fracción molar o la concentración del líquido para la fase líquida. Cuando se trabaja con un soluto que está presente en las dos fases es de utilidad emplear la constante de Henry adimensional.

El dióxido de carbono es el compuesto que se desea extraer del agua por medio de un flujo de aire; la constante adimensional de Henry provee información del componente en la fase gas y en la fase líquida.

De acuerdo con la base de datos del NIST (National Institute of Standards and Technology) la constante de Henry es 0,034 mol/L atm. [42]

Ecuación 6.

Constante de Henry adimensional

$$H_{YC} = \frac{H_{PC}}{RT}$$
$$H_{YC} = \frac{\frac{1}{0,034 \frac{\text{mol}}{\text{L atm}}}}{0,082 \frac{\text{atm L}}{\text{mol K}} * 298,15 \text{ K}}$$
$$H_{YC} = 1,1865$$

4.5.7 Factor de stripping

El stripping es un mecanismo de desorción utilizando una corriente de aire como medio de arrastre.

Un parámetro comúnmente utilizado para la evaluación de las torres empacadas es el factor de stripping; si este valor es menor a 1 el tratamiento no se puede realizar por medio de esa técnica; si es mayor a 1 el tratamiento se puede realizar por medio de la desorción a través de una corriente de aire. [43]

Ecuación 7.

Factor de stripping

$$S = \frac{G}{L} * H_{YC}$$

$$S = 10 * 1,1865$$

$$S = 11,86$$

El factor de stripping dio 11,86 esto indica que el proceso de desgasificación y aireación se puede realizar por medio del stripping.

4.5.8 Características del empaque

Para realizar los cálculos correspondientes a la torre empacada es necesario conocer el área superficial del empaque y el factor de empaquetamiento (Figura 25).

Figura 25.

Datos de los anillos Pall 25 mm

TECHNICAL DATA	
25mm Pall Ring	
Free Space (%)	91
Specific Surface Area (m ² /m ³)	209
No. Per Unit Volume (m ³)	49,360
Packing Factor (m ⁻¹)	176

Nota. Datos técnicos de los anillos Pall de 25 mm. Tomado de: The Pall Rings Company, "Pall Rings 25 mm", [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/HnWfG9U> [Acceso 6 jun, 2021]

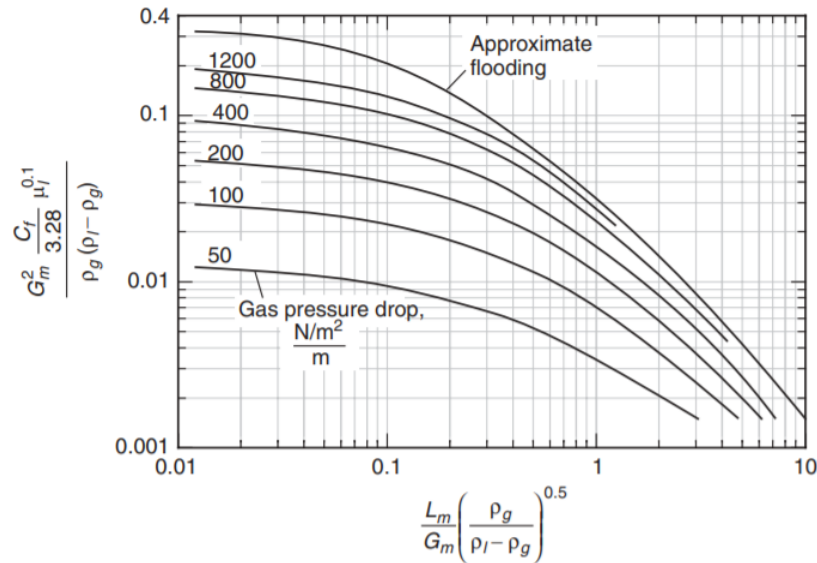
Anteriormente se había realizado la selección de los anillos Pall de 25 mm elaborados en polipropileno. Los datos fueron tomados de The Pall Rings Company, un distribuidor de este tipo de empaques.

4.5.9 Diámetro de la columna empacada

Para calcular el diámetro de la columna empacada se toma en cuenta la relación de Eckert (Figura 26).

Figura 26.

Gráfica de Eckert



Nota. Gráfica de Eckert. Tomado de: MWH Water Treatment. "Stripping and aeration towers", [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/XnWjr8F> [Acceso 6 jun, 2021]

La relación de Eckert utiliza la relación gas-líquido másica; para el diseño del equipo se hizo la suposición de la relación gas-líquido volumétrica, por lo cual es necesario realizar la conversión.

Ecuación 8.

Relación G/L másica

$$\frac{G_m}{L_m} = \left(\frac{Q_a}{Q} \right) * \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)$$

$$\frac{G_m}{L_m} = 10 * \left(\frac{1,18 \frac{kg}{m^3}}{997 \frac{kg}{m^3}} \right)$$

$$\frac{G_m}{L_m} = 0,0119$$

Posteriormente se calcula el eje X para la ubicación en la gráfica de Eckert.

Ecuación 9.

Relación de Eckert eje x

$$x = \frac{L_m}{G_m} * \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l - \rho_g}}$$

$$x = \frac{1}{0,0119} * \sqrt{\frac{1,18 \frac{kg}{m^3}}{997 \frac{kg}{m^3} - 1,18 \frac{kg}{m^3}}}$$

$$x = 2,90$$

Con el valor de x se ubica el eje y en la Figura 26 asumiendo una caída de presión; de acuerdo con John Crittenden para el diseño de una torre empacada la caída típica de presión en el diseño es de 50 N/m²/m [43], por lo tanto, se toma este valor. El eje y es igual a 0,00177.

El eje y es una expresión matemática que involucra la carga hidráulica del gas, el coeficiente de empaque, las densidades de los líquidos y su respectiva viscosidad. Con el valor obtenido se realiza el despeje de la carga hidráulica del gas.

Ecuación 10.

Relación de Eckert eje y

$$y = \frac{G_m^2 * \frac{Cf}{3,28} * \mu_l^{0,1}}{\rho_g * (\rho_l - \rho_g)}$$

Se realiza el despeje para determinar la carga hidráulica del gas.

Ecuación 11.

Carga hidráulica del gas

$$G_m^2 = \sqrt{\frac{y * \rho_g * (\rho_l - \rho_g)}{\frac{Cf}{3,28} * \mu_l^{0,1}}}$$

$$G_m = \sqrt{\frac{0,00177 * 1,18 \frac{kg}{m^3} * \left(997 \frac{kg}{m^3} - 1,18 \frac{kg}{m^3}\right)}{\frac{176 m^{-1}}{3,28} * 0,000891 Pa * s^{0,1}}}$$

$$G_m = 0,280 \frac{kg}{m^2 * s}$$

Luego se determina la carga hidráulica del agua.

Ecuación 12.

Carga hidráulica del agua

$$L_m = \frac{G_m}{\frac{Q_a}{Q} * \frac{\rho_g}{\rho_l}}$$

$$L_m = \frac{0,280 \frac{kg}{m^2 * s}}{10 * \frac{1,18 \frac{kg}{m^3}}{997 \frac{kg}{m^3}}}$$

$$L_m = 23,586 \frac{kg}{m^2 * s}$$

Con los datos obtenidos es posible calcular el área de la torre, para ello es necesario el caudal de agua utilizado.

Actualmente la empresa Lucarvel para realizar el proceso de recambios de agua utiliza una bomba de 1HP la cual bombea agua a 320 L/min (0,0053 m³/s), este caudal va a ser utilizado como caudal de diseño.

Ecuación 13.

Área de la torre

$$A = \frac{Q * \rho_l}{L_m}$$

$$A = \frac{0,0053 \frac{m^3}{s} * 997 \frac{kg}{m^3}}{23,586 \frac{kg}{m^2 * s}}$$

$$A = 0,225 \text{ m}^2$$

Con el área calculada se determina el diámetro tomando como base la ecuación del diámetro de un círculo, pues el área calculada es el área transversal.

Ecuación 14.

Diámetro de la torre

$$D = 2 * \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

$$D = 2 * \sqrt{\frac{0,225 \text{ m}^2}{\pi}}$$

$$D = 0,536 \text{ m}$$

4.5.10 Coeficientes de transferencia de masa

La correlación de Onda (Figura 27) se utiliza para calcular los coeficientes de transferencia de masa en la fase líquida y en la fase gas en procesos de stripping.

Figura 27.

Correlación de Onda

$$k_l = 0,0051 \left(\frac{L_m}{a_w \mu_l} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\mu_l}{\rho_l D_l} \right)^{-0,5} (a_t d_p)^{0,4} \left(\frac{\rho_l}{\mu_l g} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

$$k_g = 5,23 (a_t D_g) \left(\frac{G_m}{a_t \mu_g} \right)^{0,7} \left(\frac{\mu_g}{\rho_g D_g} \right)^{\frac{1}{3}} (a_t d_p)^{-2}$$

$$a_w = a_t \left\{ 1 - \exp \left[-1,45 \left(\frac{\sigma_c}{\sigma} \right)^{0,75} (Re)^{0,1} (Fr)^{-0,05} (We)^{0,2} \right] \right\}$$

$$Re = \frac{L_m}{a_t \mu_l} \quad Fr = \frac{(L_m)^2 a_t}{(\rho_l)^2 g} \quad We = \frac{(L_m)^2}{\rho_l a_t \sigma}$$

Nota. Correlación de Onda. Tomado de: MWH Water Treatment. "Stripping and aeration towers", [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/XnWjr8F> [Acceso 6 jun, 2021]

La extracción de dióxido de carbono del agua depende de la difusividad de este compuesto en el agua y en el aire. Para el análisis del sistema en cuanto a la transferencia de masa es necesario conocer el valor de la constante de global de transferencia de masa del dióxido de carbono en la fase líquida (K_{La}), el cual puede ser calculado mediante la correlación de Onda.

De acuerdo con un estudio realizado por el colegio universitario del Sudeste de Noruega en el cual se evalúa la incertidumbre de los modelos matemáticos involucrados en la transferencia de masa, la correlación de Onda tiene una incertidumbre de 5% en el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y un 3,7% para el área interfacial aplicándola en empaques al azar. [44]

Los datos necesarios para realizar el cálculo de la correlación de Onda se observan en la Tabla 16.

Tabla 16.

Datos necesarios para la correlación de Onda

Parámetro	Valor	Unidades
L_m	23,59	kg/m ² s
D_l	-	m ² /s
ρ_l	997,00	kg/m ³
μ_l	$8,91 \cdot 10^{-4}$	Pa s
G_m	0,28	kg/m ² s
D_g	-	m ² /s
ρ_g	1,18	kg/m ³
μ_g	$1,85 \cdot 10^{-5}$	Pa s
a_t	209	m ⁻¹
d_p	0,025	m
g	9,81	m/s ²
σ_c	0,033	kg/s ²
σ	0,072	kg/s ²

Nota. Datos necesarios para el cálculo de la correlación de Onda.

Los datos σ_c y σ corresponden a la tensión superficial del material del empaque y del agua respectivamente. Para el polipropileno este valor corresponde a 0,033 kg/s² y para el agua a 25°C es de 0,072 kg/s².

El coeficiente de difusión en la fase líquida D_l es calculado mediante la relación de Hayduk-Laudie.

Ecuación 15.

Correlación de Hayduk-Laudie

$$D_l = \frac{13,26 * 10^{-9}}{\mu_l^{1,14} * V_b^{0,589}}$$

El volumen molar es calculado a partir de los volúmenes atómicos tabulados por LeBas en 1965 (Tabla 17).

Tabla 17.

Volúmenes atómicos de elementos químicos

<i>Elemento</i>	<i>Volumen atómico (cm³/mol)</i>	<i>Circunstancia</i>
Aire	29,9	
Arsénico	30,5	
Bismuto	48,0	
Bromino	27,0	
Carbon	14,8	
Flúor	8,7	
Hidrógeno	3,7	En compuestos orgánicos
	7,2	Hidrógeno molecular
Mercurio	19,0	
Nitrógeno	15,6	
	10,5	Aminas primarias
	12,0	Aminas secundarias

Tabla 17(Continuación)

Oxígeno	7,4	Como ácido carbónico
	7,4	En aldehídos
	9,1	En metil esterres
	9,9	En metil éteres
	12,0	En ácidos
	8,3	En unión con S, P o N

Nota. Correlación de Onda. Tomado de: MWH Water Treatment. "Strippng and aereation towers", [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/XnWjr8F> [Acceso 6 jun, 2021]

Para determinar el volumen molar se utiliza el volumen atómico del oxígeno en su forma como ácido carbónico.

Tabla 18

Volumen molar del dióxido de carbono

Compuesto	# Moléculas	Volumen molar (cm³/mol)
Carbono	1	14,8
Oxígeno	2	14,8
Dióxido de carbono		29,6

Nota. Determinación del volumen molar del dióxido de carbono.

Ecuación 16.

Cálculo del coeficiente de difusión líquido

$$D_l = \frac{13,26 * 10^{-9}}{0,891^{1,14} \text{ cP} * 29,6^{0,589} \frac{\text{cm}^3}{\text{mol}}}$$

$$D_l = 2,06 * 10^{-9}$$

Para el cálculo del coeficiente de difusión en la fase gaseosa se utiliza la correlación de Wilke-Lee.

Ecuación 17.

Correlación de Wilke-Lee

$$D_g = \frac{\left(1,084 - 0,249 * \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}\right) * (T^{1,5}) * \left(\sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}\right)}{P_l * (r_{AB})^2 * f\left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}}\right)}$$

Los parámetros M_A y M_B se refieren a las masas moleculares del aire y el dióxido de carbono; r_{AB} es la separación molecular al momento de la colisión y $f(kT/\epsilon_{AB})$ es la función de colisión.

Tabla 19

Propiedades de las sustancias

CO ₂	A
Aire	B

Parámetro	Valor	Unidades
M _A	44,01	g/mol
M _B	28,96	g/mol
V _A	0,0296	L/mol
T _{B,A}	194,54	K
T _{OP}	298	K
P _{OP}	89669	Pa

Nota. Propiedades conocidas de las sustancias.

La expresión para calcular r_A y ϵ_A proviene del factor de corrección de Cunningham.

Ecuación 18

Cálculo de r_A

$$r_A = 1,18 * V_A^{\frac{1}{3}}$$

$$r_A = 1,18 * 0,0296^{\frac{1}{3}}$$

$$r_A = 0,37 \text{ nm}$$

Ecuación 19

Cálculo de ε_A/k

$$\frac{\varepsilon_A}{k} = 1,21 * T_{B,A}$$

$$\frac{\varepsilon_A}{k} = 1,21 * 194,54$$

$$\frac{\varepsilon_A}{k} = 235,39$$

El coeficiente de difusión de una sustancia cuando el gas B es aire puede ser calculado asumiendo el comportamiento del aire como una sola sustancia; siendo así el $r_B=0,3711 \text{ nm}$ y $\varepsilon_B/k=78,6$. [43]

El cálculo de la función de colisión se realiza con las ecuaciones 20, 21, 22 y 23.

Ecuación 20.

Cálculo de ε_{AB}/k

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k} = \sqrt{\frac{\varepsilon_A}{k} * \frac{\varepsilon_B}{k}}$$

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k} = \sqrt{235,39 * 78,6}$$

$$\frac{\varepsilon_{AB}}{k} = 136,02$$

Ecuación 21.

Cálculo de ee

$$ee = \log_{10} \left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}} \right)$$

$$ee = \log_{10} \left(\frac{298}{136,02} \right)$$

$$ee = 0,34$$

Ecuación 22.

Cálculo de ξ

$$\xi = (-0,14329 - 0,48343 * (ee) + 0,1939 * (ee)^2 + 0,13612 * (ee)^3 - 0,20579 * (ee)^4 + 0,083899 * (ee)^5 - 0,011491 * (ee)^6$$

$$\xi = (-0,14329 - 0,48343 * (0,34) + 0,1939 * (0,34)^2 + 0,13612 * (0,34)^3 - 0,20579 * (0,34)^4 + 0,083899 * (0,34)^5 - 0,011491 * (0,34)^6$$

$$\xi = (-0,14329 - 0,48343 * (ee) + 0,1939 * (ee)^2 + 0,13612 * (ee)^3 - 0,20579 * (ee)^4 + 0,083899 * (ee)^5 - 0,011491 * (ee)^6$$

$$\xi = -0,2825$$

Ecuación 23.

Cálculo de $f(kT/\epsilon_{AB})$

$$f \left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}} \right) = 10^{\xi}$$

$$f \left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}} \right) = 10^{-0,2825}$$

$$f \left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}} \right) = 0,5218$$

El valor de r_{AB} es el promedio de r_A y r_B

Ecuación 24.

Cálculo de r_{AB}

$$r_{AB} = \frac{r_A + r_B}{2}$$

$$r_{AB} = \frac{0,37 \text{ nm} + 0,3711 \text{ nm}}{2}$$

$$r_{AB} = 0,368 \text{ n}$$

Una vez se tiene la totalidad de los datos se aplica la correlación de Wilke-Lee para el coeficiente de difusión en la fase gaseosa.

Ecuación 25.

Cálculo del coeficiente de difusión gaseoso

$$D_g = \frac{\left(1,084 - 0,249 * \sqrt{\frac{1}{44,01} + \frac{1}{28,96}}\right) * (298^{1,5}) * \left(\sqrt{\frac{1}{44,01} + \frac{1}{28,96}}\right)}{89669 \text{ Pa} * (0,368 \text{ nm})^2 * 0,5218}$$

$$D_g = 0,1989 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$$

$$D_g = 1,99 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Teniendo en cuenta la información presentada en la Tabla 16 los datos necesarios para realizar el cálculo de la correlación de Onda ya están completos.

En la Tabla 20 se encuentran los datos necesarios para el cálculo de la correlación de Onda y las restricciones para utilizarla; se busca comprobar que se cumplan las restricciones para iniciar con el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa.

Tabla 20.

Datos y restricciones de la correlación de Onda

Parámetro	Valor	Unidades
L _m	23,59	kg/m ² s
D _l	2,06*10 ⁻⁹	m ² /s
ρ _l	997,00	kg/m ³
μ _l	8,91*10 ⁻⁴	Pa s
G _m	0,28	kg/m ² s

Tabla 20 (Continuación)

D_g	$1,99 \cdot 10^{-5}$	m^2/s
ρ_g	1,18	kg/m^3
μ_g	$1,85 \cdot 10^{-5}$	$Pa \cdot s$
a_t	209	m^{-1}
d_p	0,025	m
g	9,81	m/s^2
σ_c	0,033	kg/s^2
σ	0,072	kg/s^2

$$d_p < 0,0508 \text{ m}$$

$$0,8 < L_m < 43 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

$$0,014 < G_m < 1,7 \text{ kg/m}^2 \text{ s}$$

Nota. Restricciones de la correlación de Onda. Tomado de: MWH Water Treatment. "Stripping and aeration towers", [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/XnWjr8F> [Acceso 6 jun, 2021].

Los datos presentados cumplen con las restricciones. El primer paso es calcular los números adimensionales de Reynolds, Froude y Weber.

Ecuación 26.

Número de Reynolds

$$Re = \frac{L_m}{a_t * \mu_l}$$

$$Re = \frac{23,59 \frac{kg}{m^2 s}}{209 \text{ m}^{-1} * 0,000891 \frac{kg}{m s}}$$

$$Re = 126,66$$

Ecuación 27.

Número de Froude

$$Fr = \frac{L_m^2 * a_t}{\rho_l * g}$$

$$Fr = \frac{\left(23,59 \frac{kg}{m^2 s}\right)^2 * 209 m^{-1}}{\left(997 \frac{kg}{m^3}\right)^2 * 9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$Fr = 0,0119$$

Ecuación 28.

Número de Weber

$$We = \frac{L_m^2}{\rho_l * a_t * \sigma}$$

$$We = \frac{\left(23,59 \frac{kg}{m^2 s}\right)^2}{997 \frac{kg}{m^3} * 209 m^{-1} * 0,072 \frac{kg}{s^2}}$$

$$We = 0,037$$

El número de Reynolds caracteriza el movimiento de un fluido en laminar o turbulento; el número de Froude relaciona el efecto de las fuerzas de inercia y la gravedad sobre un fluido y el número de Weber es una medida de la inercia del fluido comparada con su tensión superficial.

Una vez obtenidos los números adimensionales se calcula el área de superficie mojada del empaque.

Ecuación 29.

Área mojada del empaque a_w

$$a_w = a_t * \left(1 - \exp\left[-1,45 * \left(\frac{\sigma_c}{\sigma}\right)^{0,75} * (Re)^{0,1} * (Fr)^{-0,05} * (We)^{0,2}\right]\right)$$

$$a_w = 209 \text{ m}^{-1}$$

$$\left(1 - \exp \left[-1,45 * \left(\frac{0,033 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}}{0,072 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}} \right)^{0,75} * (126,66)^{0,1} * (0,0119)^{-0,05} * (0,037)^{0,2} \right] \right)$$

$$a_w = 119,34 \text{ m}^{-1}$$

El área mojada del empaque es el área de cada empaque que va a estar en contacto con el líquido.

Luego de obtener ese dato se calcula el coeficiente de tasa de transferencia de masa en la fase líquida y el coeficiente de tasa de transferencia de masa en la fase gaseosa.

Ecuación 30.

Coficiente de tasa de transferencia de masa (líquido)

$$k_l = 0,0051 * \left(\frac{L_m}{a_w * \mu_l} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{\mu_l}{\rho_l * D_l} \right)^{-0,5} * (a_t * d_p)^{0,4} * \left(\frac{\rho_l}{\mu_l * g} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

$$k_l = 0,0051 * \left(\frac{23,59 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}}{119,34 \text{ m}^{-1} * 0,000891 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} \right)^{\frac{2}{3}} * \left(\frac{0,000891 \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2,06 * 10^{-9} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \right)^{-0,5} * (209 \text{ m}^{-1} * 0,025 \text{ m})^{0,4} * \left(\frac{997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,000891 \frac{\text{kg}}{\text{m s}} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right)^{-\frac{1}{3}}$$

$$k_l = 3,6 * 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ecuación 31.

Coefficiente de tasa de transferencia de masa (gas)

$$k_g = 5,23 * (a_t * D_g) * \left(\frac{G_m}{a_t * \mu_g} \right)^{0,7} * \left(\frac{\mu_g}{\rho_g * D_g} \right)^{\frac{1}{3}} * (a_t * d_p)^{-2}$$
$$k_g = 5,23 * \left(209 \text{ m}^{-1} * 1,99 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right) * \left(\frac{0,28 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}}}{209 \text{ m}^{-1} * 1,85 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}} \right)^{0,7}$$
$$* \left(\frac{1,85 * 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}}{1,18 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 1,99 * 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \right)^{\frac{1}{3}} * (209 \text{ m}^{-1} * 0,025 \text{ m})^{-2}$$
$$k_g = 0,015 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por último, la constante de global de transferencia de masa del dióxido de carbono en la fase líquida (K_{La}) es calculada mediante la Ecuación 32.

Ecuación 32.

Constante de global de transferencia de masa en la fase líquida (K_{La})

$$\frac{1}{K_{La}} = \frac{1}{k_l * a_w} + \frac{1}{k_g * a_w * H_{YC}}$$
$$\frac{1}{K_{La}} = \frac{1}{3,6 * 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{s}} * 119,34 \text{ m}^{-1}} + \frac{1}{0,015 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 119,34 \text{ m}^{-1} * 1,1865}$$
$$\frac{1}{K_{La}} = 23,88 \text{ s}$$
$$K_{La} = \frac{1}{23,88} = 0,042 \text{ s}^{-1}$$

Estudios han encontrado que la correlación de Onda para los coeficientes de transferencia de masa sobreestima los valores de K_{La} para empaques de 1 pulgada o superiores. [43]

En 1998 Djebbar y Narbaitz realizaron una modificación a la correlación de Onda, en la cual incluían una recalibración y ajuste en las constantes de cálculo, un número de Reynolds para el flujo gaseoso y la eficiencia del empaque dentro de la determinación del área superficial del empaque. Las recalibraciones requerían de una serie de iteraciones suponiendo la altura de la columna empacada; disminuyendo el error un 20% frente a la correlación de Onda. [45]

Debido a la cantidad de tiempo que tomaba determinar la constante K_{La} por medio de la recalibración de la correlación de Onda actualmente se utiliza un factor de seguridad.

Un factor de seguridad es un valor que determina el porcentaje de sobreestimación de la correlación de Onda, es decir, si se toma un factor de seguridad de 0,8 indica una sobreestimación del 20% de la correlación de Onda. [46]

De acuerdo con Djebbar y Narbaitz se recomienda un factor de seguridad de 0,7 como estimación conservadora de la altura del empaque. [43]

Ecuación 33.

Factor de seguridad

$$FS = \frac{K_{La} \text{diseño}}{K_{La} \text{Onda}}$$

Tomando el factor de seguridad como 0,7 se obtiene que el K_{La} de diseño es de $0,029 \text{ s}^{-1}$.

4.5.11 Altura de la columna empacada

En una columna empacada la altura está definida por la multiplicación de la altura de unidad de transferencia (HTU) y el número de unidades de transferencia (NTU).

Ecuación 34.

Altura del lecho empacado

$$Z = HTU * NTU$$

La altura de unidad de transferencia es calculada con la Ecuación 35

Ecuación 35.

Altura de unidad de transferencia (HTU)

$$HTU = \frac{Q}{A * K_{La}}$$

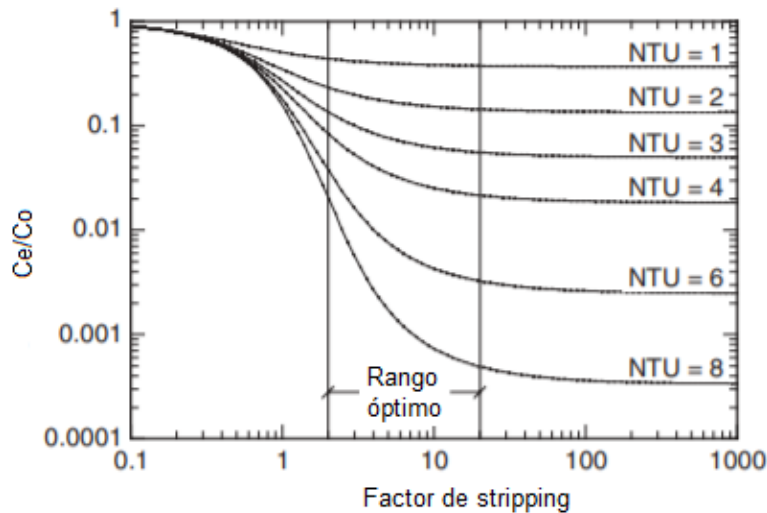
$$HTU = \frac{0,005 \frac{m^3}{s}}{0,225 m^2 * 0,029 s^{-1}}$$

$$HTU = 0,807 m$$

El número de unidades de transferencia (NTU) puede ser calculado matemática y gráficamente, para el presente documento se va a realizar de las dos formas.

Figura 28

Gráfica número de unidades de transferencia (NTU)



Nota. Gráfica para determinar NTU. Tomado de: MWH Water Treatment. "Stripping and aeration towers", [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/XnWjr8F> [Acceso 6 jun, 2021]

En la Figura 28 se observa que el rango óptimo del factor de stripping se encuentra entre 2 y 20; el factor de stripping del proceso es de 11,86. El eje y es la división entre

la concentración de dióxido de carbono en el efluente con la concentración de dióxido de carbono en la alimentación, arrojando un valor de 0,57.

Al ubicar el punto en la gráfica se obtiene un NTU aproximado de 0,6.

Matemáticamente el NTU se puede calcular mediante la Ecuación 36.

Ecuación 36.

Número de unidades de transferencia (NTU)

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

$$NTU = \frac{11,86}{11,86-1} * \ln \left[\frac{1 + \left(\frac{30}{17}\right) * (11,86-1)}{11,86} \right]$$

$$NTU = 0,58$$

Para temas del cálculo de la altura de la torre se utiliza el valor de NTU calculado debido a que el valor obtenido gráficamente puede verse sujeto a errores de lectura

Ecuación 37.

Cálculo de la altura del lecho empacado

$$Z = 0,807 \text{ m} * 0,58$$

$$Z = 0,47 \text{ m}$$

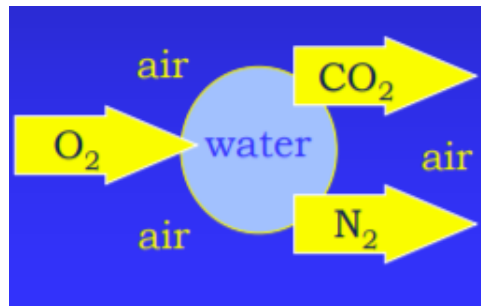
4.6 Proceso de aireación en la torre empacada

Como bien es sabido el diseño de la torre se realizó con el objetivo de disminuir la concentración de dióxido de carbono debido a que era el parámetro que más representaba peligro en cuanto a la integridad del proceso. Por otro lado, en la sección 4.5 se determina que para el proceso de oxigenación los valores de G/L deben ser muy bajos; al operar con un G/L de 10 se concluye que el proceso de oxigenación se realiza simultáneamente con el proceso de desgasificación.

La Figura 29 muestra el comportamiento típico del agua de acuicultura con bajo contenido de oxígeno disuelto y alto contenido de dióxido de carbono disuelto.

Figura 29.

Intercambio de gases en el agua



Nota. Intercambio de gases en una molécula de agua. Tomado de: University of Arizona, “CARBON DIOXIDE STRIPPING”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/unlBlm6> [Acceso 10 jun, 2021]

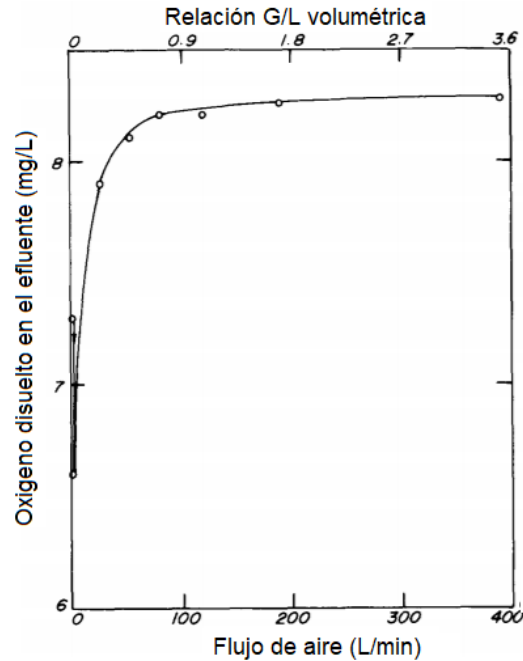
A medida que el aire entra en contacto con el agua los gases disueltos se acercan al equilibrio con las presiones parciales en la atmósfera; como la molécula del agua está en contacto con aire atmosférico para lograr el equilibrio se transfiere oxígeno dentro de la molécula y dióxido de carbono fuera de ella. [41]

A flujos de aire bajos, la transferencia de oxígeno se reduce; a medida que aumenta la tasa de flujo de aire, la tasa de transferencia de oxígeno aumenta bruscamente hasta una relación de gas-líquido de 0,9 y luego se acerca a un valor asintótico. [47]

El valor asintótico presentado en la Figura 30 corresponde a la concentración de saturación del oxígeno en el agua en condiciones de 1 atm de presión y una temperatura de 25°C; si se realiza el diagrama con otras condiciones termodinámicas el valor asintótico será la concentración de saturación del oxígeno en esas nuevas condiciones

Figura 30.

Concentración de oxígeno en el efluente

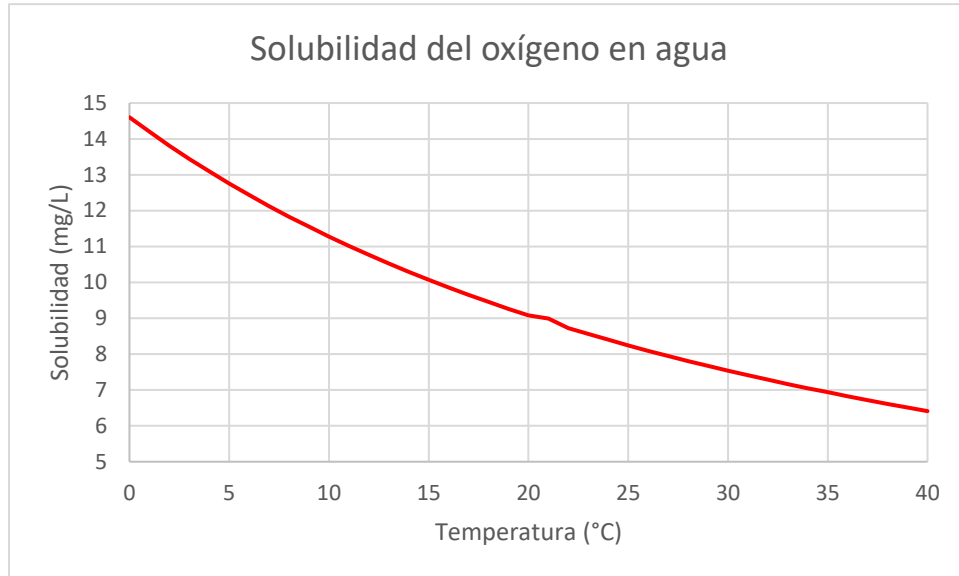


Nota. Concentración de oxígeno en el efluente. Tomado de: Aquacultural Engineering, “The performance and design of packed column aereation systems for aquaculture”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/xn7abf3> [Acceso 18 jun, 2021]

En un estudio realizado por la European Inland Fisheries Advisory Commission (EIFAC) se establecen las concentraciones de saturación del oxígeno a diferentes temperaturas (Figura 31).

Figura 31

Concentraciones de saturación de oxígeno



Nota. Concentraciones de saturación de oxígeno a diferentes temperaturas y 1 atm de presión. Tomado de: FAO, “Dissolved oxygen”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/rn7hBLq> [Acceso 18 jun, 2021]

La concentración de saturación a la temperatura del proceso diseñado (25°C) es de 8,244 mg/L.

Al manejar un valor de G/L de 10 la concentración de oxígeno disuelto en el efluente pertenece a la concentración de saturación a las condiciones del proceso diseñado en este documento, es decir, 0,89 atm y 25°C. Para determinar ese valor se toma como base la ley de Henry.

La ley de Henry establece que a una temperatura constante la cantidad de gas disuelto en un líquido depende de la presión parcial que ejerce el gas sobre el líquido.

Ecuación 38.

Ley de Henry

$$P_i = x_i * H_i$$

Como la presión es directamente proporcional a la concentración de saturación, cualquier cambio sobre la presión afecta de igual forma a la concentración de saturación; la constante de Henry permanece igual con los cambios de presión.

Al conocer los valores asociados a la saturación del oxígeno a una presión de 1 atm y 25°C se puede determinar la concentración de saturación a una presión de 0,89 atm por medio de una relación obtenida de la ley de Henry.

Ecuación 39.

Ley de Henry modificada

$$\frac{P_{i(1 \text{ atm})}}{P_{i(0,89 \text{ atm})}} = \frac{x_{i(1 \text{ atm})}}{x_{i(0,89 \text{ atm})}} * \frac{H_i}{H_i}$$

La constante de Henry no cambia debido a que no existen variaciones en la temperatura, por lo tanto, puede simplificarse de la expresión.

$$\frac{P_{i(1 \text{ atm})}}{P_{i(0,89 \text{ atm})}} = \frac{x_{i(1 \text{ atm})}}{x_{i(0,89 \text{ atm})}}$$

La presión parcial que ejerce el gas sobre el líquido depende de la concentración del gas en el aire y la presión del sistema.

$$\frac{P_{1 \text{ atm}} * x}{P_{0,89 \text{ atm}} * x} = \frac{x_{i(1 \text{ atm})}}{x_{i(0,89 \text{ atm})}}$$

La concentración del gas en el aire no se ve afectada con los cambios de presión, por lo que puede simplificarse de la expresión.

$$\frac{P_{1 \text{ atm}}}{P_{0,89 \text{ atm}}} = \frac{x_{i(1 \text{ atm})}}{x_{i(0,89 \text{ atm})}}$$

Por lo tanto, la expresión para determinar la concentración de saturación a la presión del sistema diseñado depende de la presión del sistema y sus respectivas concentraciones de saturación.

$$x_{i(0,89 \text{ atm})} = \frac{8,244 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,89 \text{ atm}}{1 \text{ atm}}$$

De esta forma se obtiene que la concentración de oxígeno disuelto en el efluente para el proceso diseñado es de aproximadamente 7,34 mg/L.

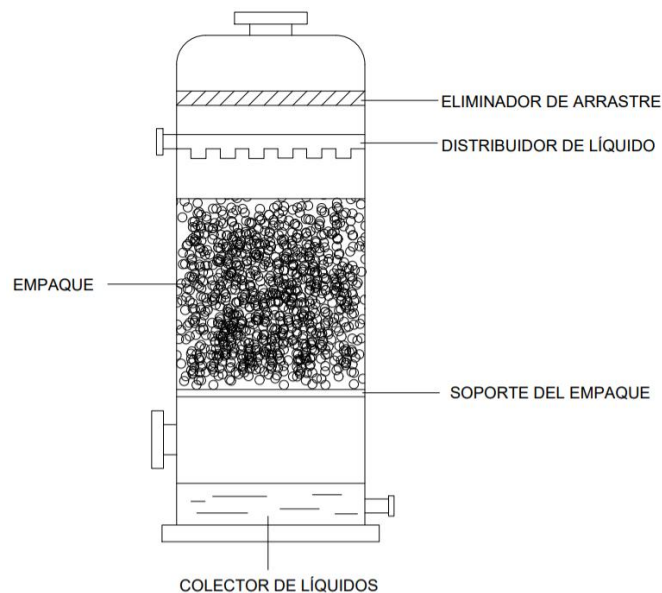
4.7 Constituyentes internos

Para el correcto funcionamiento del equipo son necesarios ciertos elementos adicionales a la coraza y el empaque. Actualmente la oferta de este tipo de accesorios es altamente variada y las industrias se encargan en realizar productos de alta calidad y eficiencia, por lo cual, la elección de estos resulta crítica ya que la opción inadecuada resulta poco beneficiosa para el proceso.

Para la torre a diseñar los constituyentes internos consisten en eliminadores de arrastre, colectores de líquido, soportes de empaque y distribuidor de líquidos (Figura 32).

Figura 32.

Constituyentes internos



Nota. Constituyentes internos de una columna empacada.

4.7.1 Eliminadores de arrastre

Cuando el gas abandona la parte superior de la torre puede acarrear gotas de líquido en forma de niebla.

Un desnebulizador es un dispositivo utilizado para la separación de un líquido en forma de finas gotas mediante el fenómeno físico de la coalescencia. La forma de laberinto del dispositivo provoca cambios de dirección y de velocidad permitiendo la separación del líquido por medio de la gravedad. [48]

El eliminador de arrastre consiste en un conjunto de mallas entretejidas de alambre, teflón o polietileno que tienen la capacidad de retener todas las gotas que acompañan al gas; generalmente se instala sobre la entrada del líquido. [34]

Figura 33.

Eliminador de arrastre



Nota. Eliminador de arrastre. Tomado de MTE, “Demister Pads”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/0nIGWG1> [Acceso 10 jun, 2021]

4.7.2 Colectores de líquidos

El colector de líquidos es necesario cuando la corriente de agua sale por un costado de la torre; es utilizado para retener el flujo líquido sin interrumpir el flujo del gas. [48]

Se ubican en los fondos de la torre y sobre cada redistribuidor del líquido. Una de sus funciones esenciales es lograr el mezclado del líquido antes de retirarlo del proceso.

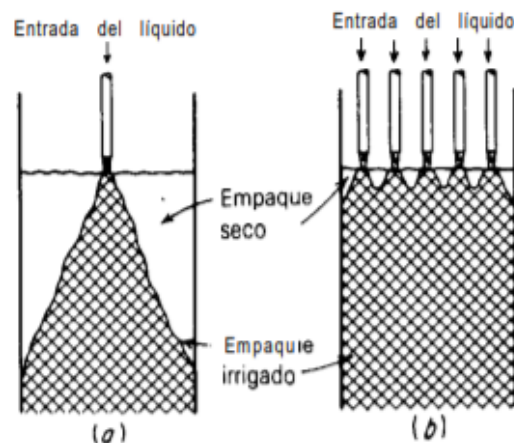
4.7.3 Soporte de empaque

Para mantener el empaque en su posición es necesario un espacio abierto en el fondo de la torre que permita el flujo del líquido y del gas sin restricción alguna; sin embargo, como su función es soportar los empaques debe tener la fuerza suficiente para soportar el peso del empaque y del agua que transita en el proceso. [34]

4.7.4 Distribuidor de líquidos

Figura 34

Distribución del líquido



Nota. Distribución del líquido en una columna empacada. Tomado de: Operaciones de transferencia de masa, “Torres empacadas”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/GnILkp2> [Acceso 10 jun, 2021]

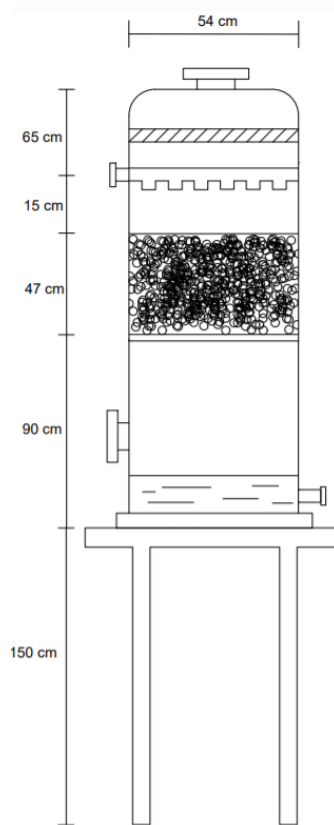
La distribución perfecta del líquido puede definirse como el abastecimiento de líquido uniformemente sobre toda la superficie del empaque. [48]

Como se puede observar en la Figura 34 una mala distribución del líquido deja empaque seco, el cual no es eficiente para la transferencia de masa. Generalmente por cada 0,1 m² de sección transversal la columna debe disponer de al menos 5 puntos de distribución del líquido para un proceso eficiente. [34]

4.8 Sistema hidrodinámico

Figura 35

Dimensiones de la torre de aireación y desgasificación



Nota. Dimensiones de la torre.

Al proponer un diseño de torre de aireación y desgasificación para la empresa Lucarvel es necesario tener en cuenta el sistema hidrodinámico, es decir, el sistema por donde se van a mover los fluidos.

Los fluidos que participan en el proceso son el agua y el aire, para ello es necesario contar con una bomba, un ventilador y tuberías para el transporte del agua.

4.8.1 Tuberías

El proceso de recambio de agua en la empresa Lucarvel se realiza a través de tuberías de PVC de 2 pulgadas; con el objetivo de mantener los costos lo más bajos posibles se busca mantener ese tipo de tubería y utilizar el inventario de tubería y accesorios disponibles en la empresa.

4.8.2 Bomba

Al igual que con las tuberías el proceso de recambio de agua utiliza una bomba centrífuga de la marca AQUA PAK de 1HP; con el fin de realizar una baja inversión para el proceso se realiza la evaluación de este tipo de bomba.

Figura 36.

Ficha técnica de la bomba

AQUA PAK®		Serie ALTRA	
MODELO: ALTRA10-1230			
IP	1	H: 14-5 m	H.Máx.: 15 m
		Q: 50-400 lpm	Q.Máx.: 400 lpm
FASES	1	Aislamiento clase F	3450 RPM
		Servicio continuo	Potencia Máx.(kW): 1.04
VOLTS	230	Rango de temperatura de operación: 5-70°C	FP(%): 92
		Protección térmica incorporada	AMP. FS: 1
			EFF de Motor(%): 72.0
			Peso: 9 kg

Nota. Ficha técnica de la bomba utilizada en la empresa Lucarvel.

El modelo de bomba que posee la empresa es el AQUA PAK ALTRA 10-1230. La ficha técnica de la bomba (Figura 36) fue tomada de uno de los equipos disponibles en la empresa.

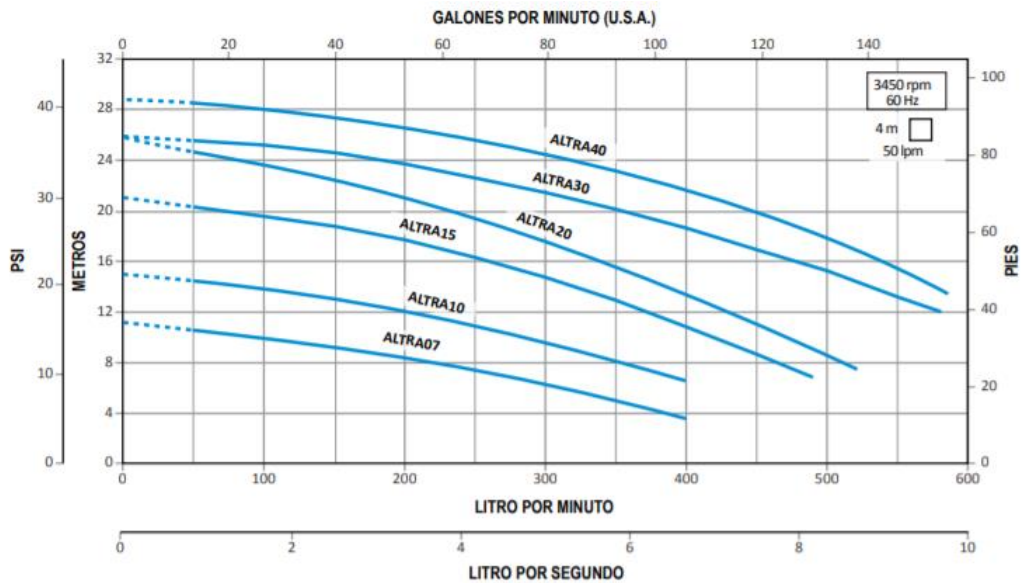
Teniendo en cuenta la Figura 35 la altura a la que debe llegar el líquido es de aproximadamente 3 metros; las pérdidas de carga a causa de las tuberías no pueden ser determinadas debido a que no se conoce con exactitud la forma como la empresa

va a realizar el recorrido de las tuberías desde la bomba hasta la parte superior del equipo.

Sin embargo, con las curvas de operación (Figura 37) se establece la cabeza máxima a la que puede llegar la bomba con un caudal de 320 L/min.

Figura 37.

Curvas de operación ALTRA PAK



Nota. Curvas de operación de la serie ALTRA PAK. Tomado de: Altamira Water, “Bombas serie Altra”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/qnSdlaj> [Acceso 11 jun, 2021]

Para un modelo de la serie ALTRA 10 la cabeza para un caudal de 320 L/min es aproximadamente 9 m.

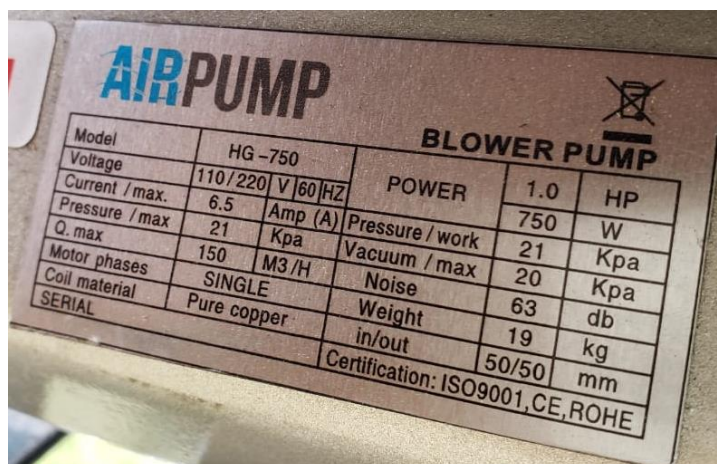
Así, se determina que los equipos de bombeo que posee la empresa son aptos para el proceso de aireación y desgasificación propuesto.

4.8.3 Ventilador

Actualmente la empresa Lucarvel cuenta con un blower para realizar el proceso de aireación.

Figura 38.

Ficha técnica del blower



Model		HG-750		POWER		1.0	HP
Voltage	110/220	V	60	HZ	Pressure / work	750	W
Current / max.	6.5	Amp (A)	Pressure / max	21	Kpa		
Q. max	21	Kpa	Vacuum / max	20	Kpa		
Motor phases	150	M3/H	Noise	63	db		
Coil material	SINGLE	Weight	in/out	19	kg		
SERIAL	Pure copper			50/50	mm		
Certification: ISO9001, CE, ROHE							

Nota. Ficha técnica del blower utilizado en la empresa Lucarvel.

Como el diseño se estableció para una relación G/L de 10 el caudal de aire necesario es de 3200 L/min, es decir 192 m³/h. El equipo que posee la empresa tiene una capacidad de bombeo máxima de 150 m³/h de aire; por lo tanto, para el proceso en cuestión no es de funcionalidad.

Para determinar el equipo necesario se tiene en cuenta el catálogo de la empresa Imporbombas ubicada en la ciudad de Bogotá.

De acuerdo con los requerimientos del proceso el modelo adecuado es el blower PW-4311 de marca Pumpower el cual presenta un caudal máximo de 210 m³/h.

Las especificaciones del equipo se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21.

Especificaciones del blower PW-4311

Potencia	1,21 HP
	0,9 kW
Tensión	Monofásica 220 V
Corriente máx. con carga	5,8 A

Tabla 21 (Continuación)

Nivel presión acústica	66 Db (A)
Caudal máximo	210 m ³ /h
	123,6 CFM (pie ³ /min)
Vacío máximo	-100 mBar
Presión máxima	10 mBar
	1,5 psi
	0,11 bar
	11 kPa
Profundidad máx.	1,1 m.c.a
Velocidad	3350 rpm
Entrada/Salida	1,5 pulg x 1,5 pulg
Dimensiones caja	34 cm x 36 cm x 36 cm
Peso aprox.	19 kg

Nota. Especificaciones del blower PW-4311 de la marca Pumpower. Tomado de: Imporbombas, “Catálogo de sopladores”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/PnSYrhv> [Acceso 12 jun, 2021]

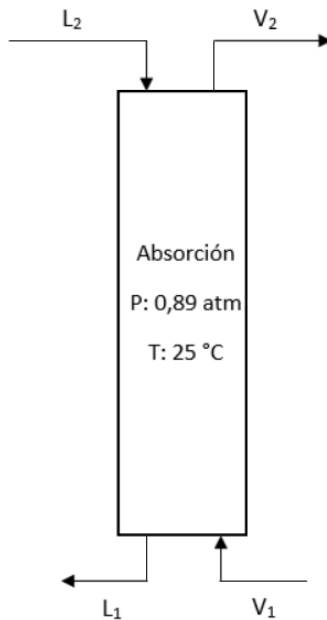
El blower que posee actualmente la empresa puede ser utilizado en el estanque de 5 metros de diámetro como equipo destinado únicamente a la aireación debido a que es la etapa más crítica del proceso.

4.9 Balance de masa

Con el diseño del equipo establecido se procede a realizar los balances de masa del procedimiento. Para una mejor comprensión se realiza el diagrama de bloques (Figura 39).

Figura 39.

Diagrama de bloques



Nota. Diagrama de bloques del proceso de aireación y desgasificación.

El balance de masa se realiza por cada componente involucrado en el proceso. Para realizar el balance del agua se asume que el aire entra seco al proceso; y debido a los constituyentes internos, sale de igual forma.

Ecuación 40.

Balance de masa para el agua

$$L_2 * x_{H_2O, L_2} + V_1 * y_{H_2O, V_1} = L_1 * x_{H_2O, L_1} + V_2 * y_{H_2O, V_2}$$

$$L_2 * x_{H_2O, L_2} = L_1 * x_{H_2O, L_1}$$

El dióxido de carbono se encuentra en una proporción muy baja en el aire atmosférico, por lo tanto, para efectos de este balance el aire tiene una composición inicial de 21% oxígeno y 79% nitrógeno.

Ecuación 41.

Balance de masa para el dióxido de carbono

$$L_2 * x_{CO_2, L_2} + V_1 * y_{CO_2, V_1} = L_1 * x_{CO_2, L_1} + V_2 * y_{CO_2, V_2}$$

$$L_2 * x_{CO_2, L_2} = L_1 * x_{CO_2, L_1} + V_2 * y_{CO_2, V_2}$$

El oxígeno es uno de los componentes del aire, también se encuentra presente en el agua del cultivo.

Ecuación 42.

Balance de masa para el oxígeno

$$L_2 * x_{O_2, L_2} + V_1 * y_{O_2, V_1} = L_1 * x_{O_2, L_1} + V_2 * y_{O_2, V_2}$$

Por último, el nitrógeno también se encuentra presente en el aire y el agua de cultivo, sin embargo, en el diseño del equipo no se tiene en cuenta la cantidad de nitrógeno en la corriente de agua de entrada.

Ecuación 43.

Balance de masa para el nitrógeno

$$L_2 * x_{N_2, L_2} + V_1 * y_{N_2, V_1} = L_1 * x_{N_2, L_1} + V_2 * y_{N_2, V_2}$$

$$V_1 * y_{N_2, V_1} = L_1 * x_{N_2, L_1} + V_2 * y_{N_2, V_2}$$

Los datos conocidos son los caudales de agua y aire (L y V) y las concentraciones de las corrientes de entrada y salida del agua y la entrada del aire. El balance de materia se realiza en base másica.

En la Tabla 22 se muestran los resultados de los respectivos balances.

Tabla 22*Resultados de los balances de materia*

Corriente	Sustancia	Fracción másica
L2	CO ₂	3,02E-05
	O ₂	2,55E-06
	H ₂ O	0,99997
L1	CO ₂	1,64E-05
	O ₂	7,37E-06
	H ₂ O	0,99996
	N ₂	1,24E-05
V1	O ₂	0,21
	N ₂	0,79
V2	CO ₂	1,28E-03
	O ₂	0,20
	N ₂	0,75
	H ₂ O	0,05

Nota. Resultados de los balances de materia.

5. SIMULACIÓN DEL PROCESO

En el capítulo en cuestión se realiza una simulación del proceso de aireación y desgasificación de acuerdo con el diseño propuesto; para ello se tiene en cuenta las dimensiones establecidas y las condiciones de operación.

5.1 Selección del simulador

Como primera instancia se requiere conocer el software a utilizar para el proceso de aireación y desgasificación. Para ello se tienen en cuenta los simuladores Aspen Hysys, Aspen Plus, Chemcad y COCO debido a que son los programas a los que se tiene acceso; todos ellos son simuladores con modelos previamente programados.

Los simuladores evaluados tienen la capacidad de evaluar procesos de destilación, absorción y desorción en columnas empacadas.

Para realizar la selección se tienen en cuenta las ventajas y desventajas de cada uno de ellos (Tabla 23).

Tabla 23.

Ventajas y desventajas de los simuladores

<i>Simulador</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Chemcad	<ul style="list-style-type: none"> *Precio más bajo que el ASPEN HYSYS o ASPEN PLUS. *Rápido acceso a la base de datos termodinámica y de propiedades. *Manejo sencillo 	<ul style="list-style-type: none"> *No es muy utilizado en la industria. *Menos potente y versátil que HYSYS y ASPEN PLUS. *Interfaz descuidada. *No tiene integrado el estándar CAPE.
COCO	<ul style="list-style-type: none"> *Es gratuito, de código abierto. *Interfaz amigable. *Se pueden utilizar paquetes de propiedades personalizados. *Se especializa en operaciones unitarias simples y procesos cortos. 	<ul style="list-style-type: none"> *Equipo limitado. *Sustancias preestablecidas básicas. *Programa inestable, puede cerrarse espontáneamente. *Número elevado de actualizaciones.

Tabla 23 (Continuación)

<i>Simulador</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Aspen Hysys	<ul style="list-style-type: none"> *Es utilizado en las grandes compañías, sobre todo en la industria del petróleo. *Más económico que ASPEN PLUS. *El método de cálculo de propagación hacia adelante y hacia atrás de variables permite ir conociendo el estado de cálculo y los posibles problemas de convergencia de algunas unidades. *Integra el estándar CAPE. *Se incluye un optimizador. 	<ul style="list-style-type: none"> *Optimizador menos eficaz que ASPEN PLUS. *Filosofía de cálculo distinta a el resto de los simuladores. *Necesidad de definir las corrientes de corte y reciclos. *Interfaz menos amigable que ASPEN PLUS. *No desarrolla la resolución orientada a ecuaciones.
Aspen Plus	<ul style="list-style-type: none"> *Es el programa más potente en su género. *Utilizado enormemente en la industria. *Presenta un optimizador más robusto que Hysys. *Obtención automática de secuencias de cálculo y corrientes de corte. *Modelo de cálculo orientado a ecuaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> *Poca aplicabilidad a la industria de petróleos. *Más costoso que Hysys.

Nota. Ventajas y desventajas de los simuladores evaluados. Tomado de: Universidad central de las Villas, “Aplicación del Aspen Plus en el análisis de la integración energética en la papelera Damuji”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/Un21HJO> [Acceso 15 jun, 2021]

De acuerdo con lo observado en la anterior tabla queda demostrado que el simulador más completo y robusto es el Aspen Plus, adicional a tener grandes aplicaciones tiene la ventaja de arrojar el resultado en mg/L que es el adecuado para demostrar el funcionamiento del equipo diseñado.

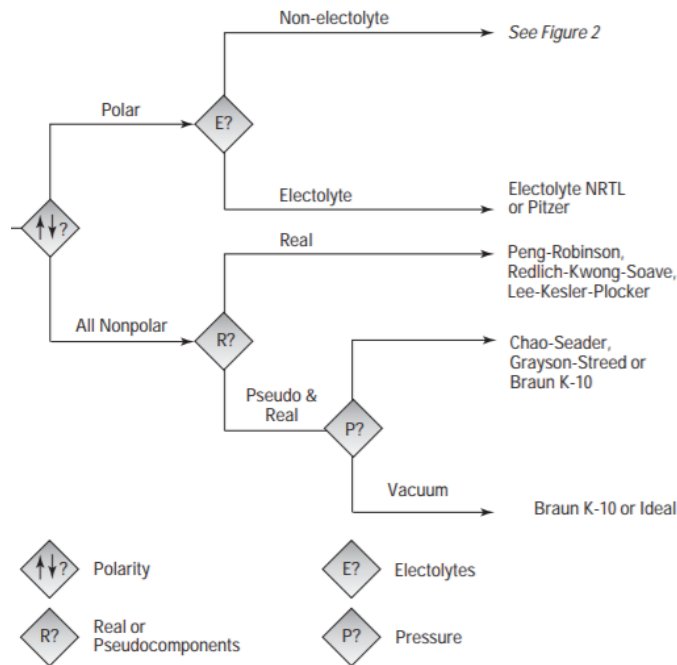
El simulador Aspen Plus va a ser utilizado en la simulación del proceso.

5.2 Selección del modelo termodinámico

Para la selección del modelo termodinámico a utilizar se toma como base el artículo “Do not gamble with physical properties for simulations” de Eric Carlson, en el cual se establecen los criterios para una buena elección del modelo termodinámico.

Figura 40.

Árbol de decisión 1

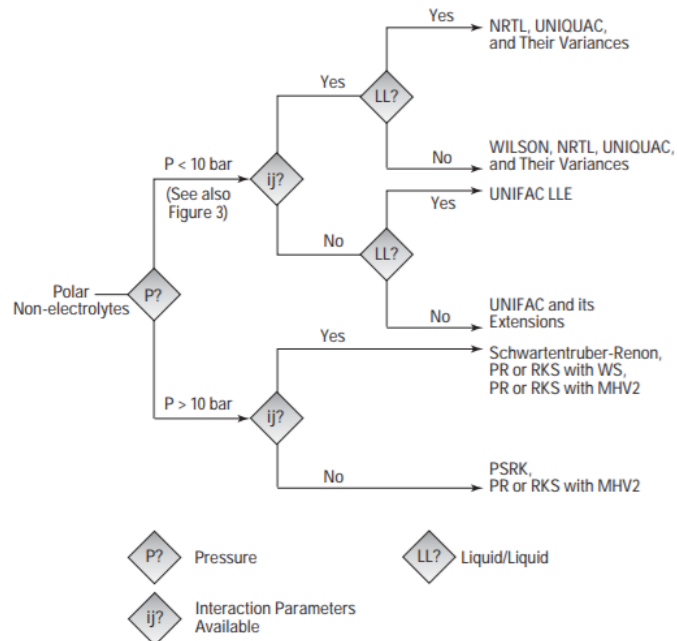


Nota. Árbol de decisión 1. Tomado de: Berkeley university, “Do not gamble with physical properties for simulations”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/un9asno> [Acceso 16 jun, 2021].

El primer criterio para determinar el paquete termodinámico es la polaridad de la sustancia que se está trabajando, en este caso el agua es polar; siguiendo el árbol de decisión el siguiente criterio es si la sustancia posee electrolitos; si bien el dióxido de carbono en agua se presenta en forma de electrolitos su concentración es tan baja, en comparación al agua, que se puede asumir como una sustancia que no posee electrolitos, siendo así es necesario remitirse al segundo árbol de decisión.

Figura 41.

Árbol de decisión 2



Nota. Árbol de decisión 2. Tomado de: Berkeley university, “Do not gamble with physical properties for simulations”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/un9asno> [Acceso 16 jun, 2021].

El equipo funciona a presión atmosférica (menor a 10 bar); y la absorción del dióxido de carbono se genera mediante interacciones binarias vapor-líquido. Teniendo en cuenta esto se determina que los modelos termodinámicos para el sistema a tratar son NRTL y UNIQUAC.

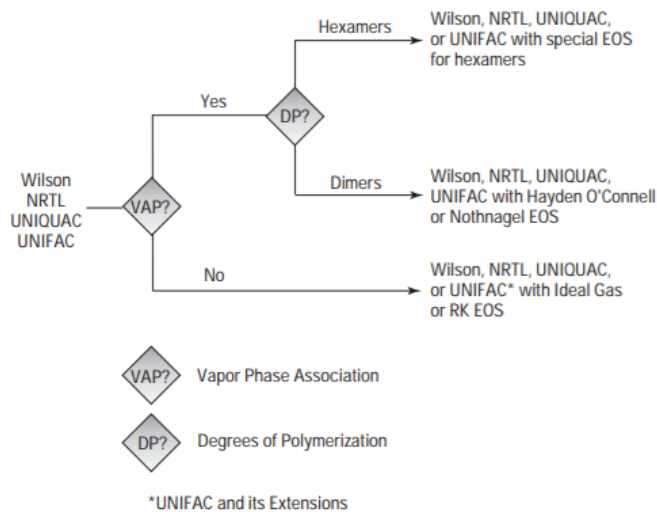
En el árbol de decisión se recomienda visitar un tercer árbol de decisión si la presión es menor a 10 bar para confirmar el modelo seleccionado.

En este tercer árbol de decisión se tienen en cuenta otros criterios, sin embargo, en los modelos termodinámicos a los que se llega por cualquiera de los caminos está presente el NRTL y el UNIQUAC.

Para el proceso en cuestión se utiliza el modelo termodinámico NRTL.

Figura 42.

Árbol de decisión 3



Nota. Árbol de decisión 3. Tomado de: Berkeley university, “Do not gamble with physical properties for simulations”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/un9asno> [Acceso 16 jun, 2021].

5.3 Desarrollo de la simulación

Una vez se tiene seleccionado el programa a utilizar y el paquete termodinámico se procede a realizar la simulación.

El proceso consiste en definir las sustancias y el paquete termodinámico seleccionado; luego se realiza el montaje del proceso en el programa y por último se analizan los resultados obtenidos, comparándolos con los datos provenientes del diseño del equipo.

El programa utilizado para el desarrollo de la simulación es Aspen Plus 11.

5.3.1 Definición de sustancias y paquete termodinámico

Lo primero que se tiene en cuenta al realizar la simulación es la definición de las sustancias y el paquete termodinámico a utilizar. Para el proceso propuesto las sustancias involucradas son el aire, compuesto principalmente por oxígeno y nitrógeno, y el agua que viene con una concentración de dióxido de carbono poco favorable para el proceso.

El programa Aspen Plus 11 posee una extensa librería de compuestos para seleccionar, sin embargo, solo se seleccionan los que interactúan en el proceso.

Figura 43.

Definición de las sustancias en Aspen Plus 11

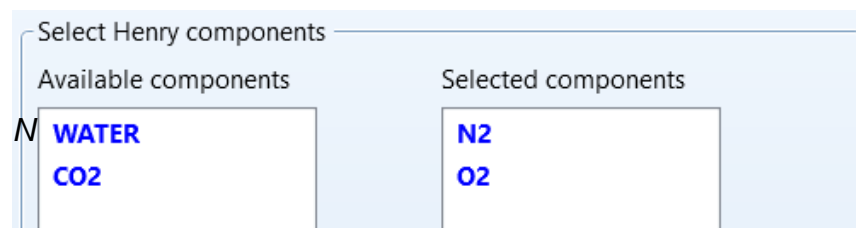
Component ID	Type	Component name	Alias
WATER	<i>Conventional</i>	WATER	H2O
CO2	<i>Conventional</i>	CARBON-DIOXIDE	CO2
O2	<i>Conventional</i>	OXYGEN	O2
N2	<i>Conventional</i>	NITROGEN	N2

Nota. Sustancias involucradas en el proceso en Aspen Plus 11.

El siguiente paso es definir los compuestos que se ven afectados por la ley de Henry. Como se determinó en la sección 4.7 la concentración del aire en el efluente es determinada por medio de esta relación; por lo cual el oxígeno y el nitrógeno se ven afectados por ella.

Figura 44.

Sustancias afectadas por la ley de Henry



Nota. Sustancias afectadas por la ley de Henry.

En la siguiente sección se añade el paquete termodinámico seleccionado en el apartado 5.2.

Figura 45.

Selección del paquete termodinámico

Property methods & options

Method filter: COMMON

Base method: NRTL

Henry components: O2

Petroleum calculation options

Free-water method: STEAM-TA

Water solubility: 3

Electrolyte calculation options

Chemistry ID: [empty]

Use true components

Method name: NRTL

Methods Assistant...

Modify

Vapor EOS: ESIG

Data set: 1

Liquid gamma: GMRENON

Data set: 1

Liquid molar enthalpy: HLMX86

Liquid molar volume: VLMX01

Heat of mixing

Poynting correction

Use liquid reference state enthalpy

Nota. Selección del paquete termodinámico en el programa Aspen Plus.

Una vez se selecciona el paquete termodinámico se puede iniciar el montaje del proceso en el archivo de simulación.

5.3.2 Montaje del proceso

El equipamiento necesario para llevar a cabo el proceso consiste en una columna de absorción, una bomba centrífuga y un blower.

En primer lugar, se definen las corrientes de entrada al proceso; por parte del aire se establece el flujo de 3200 L/min que ingresa al blower con una composición de 0,21 de oxígeno y 0,79 de nitrógeno; por parte del agua ingresa un flujo de 320 L/min a una bomba con una composición de 0,97 de agua, $3 \cdot 10^{-5}$ de dióxido de carbono y $2,6 \cdot 10^{-6}$ de oxígeno.

El proceso es isotérmico; las dos corrientes de entrada se encuentran a 25°C y 0,89 atm.

Figura 46.

Corriente de entrada (Aire)

Component	Value
WATER	
CO2	
O2	0,21
N2	0,79

Nota. Corriente de entrada al proceso de aire.

Figura 47.

Corriente de entrada (Agua)

Component	Value
WATER	0,99997
CO2	3,02415e-05
O2	2,55055e-06
N2	

Nota. Corriente de entrada al proceso de agua.

En total el sistema contiene 6 corrientes, una antes y después del blower, una antes y después de la bomba y las dos corrientes de salida, el agua limpia y el aire que arrastró el contaminante.

Con especificar dos de las cuatro corrientes de entrada es suficiente debido a que las corrientes mantienen sus propiedades al pasar por la bomba y el blower.

Luego de tener las corrientes de entrada definidas se implementa la columna de absorción y sus respectivos componentes internos.

Los componentes internos son los relacionados con los empaques y la geometría de estos; para ello se tiene en cuenta el tipo de anillo seleccionado, el material, el tamaño y las medidas de la columna empacada.

Figura 48.

Especificaciones internas de la torre

Section type Trayed Packed

Packing Type **PALL**

Packing characteristics

Vendor	RASCHIG	Section diameter	0,536 meter	Update parameters
Material	PLASTIC	Packing size	0,025 meter	
Dimension	25-MM	Packing factor	1/m	

Packed height

Packed height per stage (HETP) 0,156667 meter

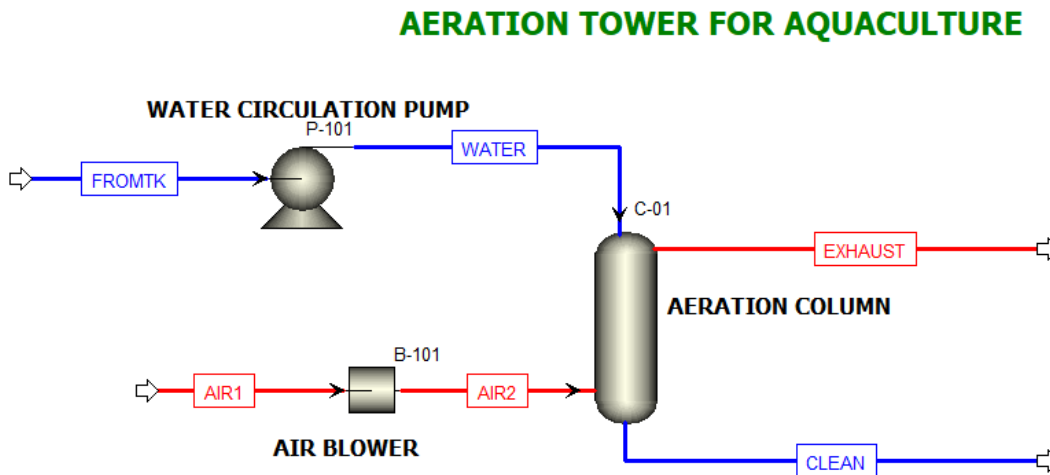
Section packed height **0,47** meter

Nota. Especificaciones internas de la torre de aireación diseñada.

El esquema general del proceso se muestra a continuación en donde las corrientes azules transportan el agua y las corrientes rojas transportan aire.

Figura 49.

Esquema general del proceso



Nota. Esquema general del proceso en Aspen Plus 11.

Una vez se definen las 2 corrientes de entrada y la geometría de la torre empacada se corre la simulación.

5.3.3 Resultados

Al momento de correr la simulación no se presentan errores en el proceso, al generar un informe de los resultados por corriente se obtienen los siguientes resultados en la concentración de los componentes involucrados.

Figura 50.

Resultados de la simulación

	Units	FROMTK	CLEAN
- Component concentration (BPS)			
WATER	mg/l	993931	994037
CO2	mg/l	30,0589	16,3278
O2	mg/l	2,53515	7,33206
N2	mg/l		12,3219

Nota. Resultados de la simulación en Aspen Plus 11.

Las corrientes de interés son las relacionadas con el agua, es decir, las corrientes FROMTK y CLEAN, las cuales indican las corrientes de entrada y salida del proceso respectivamente.

Por parte del oxígeno disuelto en el agua se obtiene una concentración final de 7,33 mg/L a partir de una concentración inicial de 2,5 mg/L y por parte del dióxido de carbono se obtiene una concentración final de 16,33 mg/L partiendo de una concentración aproximada de 30 mg/L.

Es necesario realizar la comparación entre los resultados obtenidos por medio de las correlaciones y los obtenidos por la simulación.

Ecuación 44.

Porcentaje de error

$$\%Error = \frac{Valor\ correlaciones - Valor\ simulación}{Valor\ correlaciones} * 100$$

Los resultados del porcentaje de error pueden verse reflejados en la Tabla 24.

Tabla 24.

Porcentajes de error

<i>Sustancia</i>	<i>Teórico (mg/L)</i>	<i>Experimental (mg/L)</i>	<i>%Error</i>
Dióxido de carbono	17,00	16,33	3,95%
Oxígeno	7,34	7,33	0,11%

Nota. Porcentajes de error obtenidos en la simulación.

En cuanto a la oxigenación del agua los resultados teóricos y los resultados de la simulación son bastante similares, presentando un porcentaje de error de 0,11%, comprobando el correcto funcionamiento de la torre en este aspecto.

El porcentaje de error de la desgasificación arrojó un valor de 3,95% el cual es debido a los pequeños cambios en las constantes de los empaques. En la librería del simulador el área superficial tiene un valor de 220 m⁻¹ mientras que el diseño fue realizado con las constantes provistas por el proveedor de los empaques (209 m⁻¹).

Con los resultados obtenidos se concluye que el diseño realizado es viable para aplicarlo en la empresa Lucarvel.

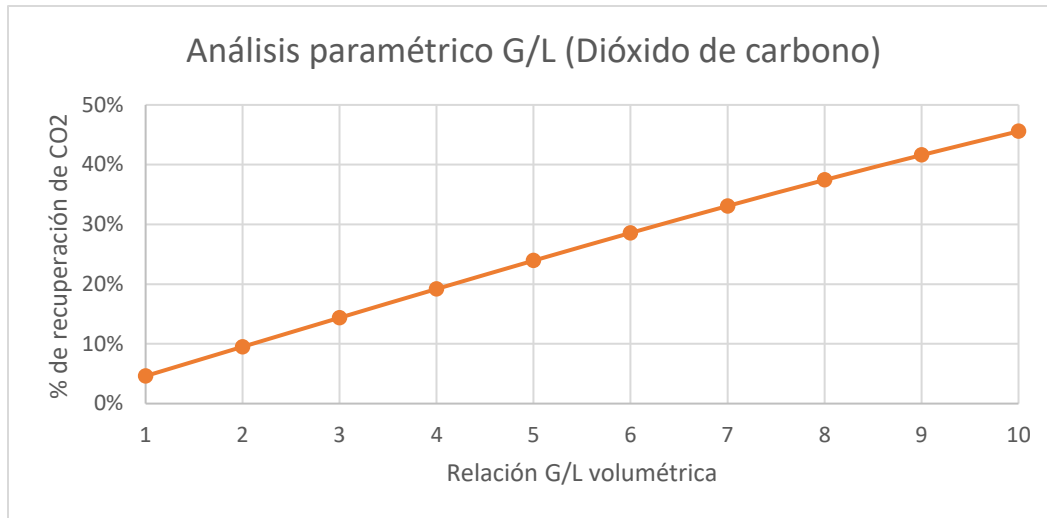
5.3.4 Análisis paramétrico

Como estudio adicional se realiza un análisis paramétrico en donde se evalúa la influencia de diferentes relaciones G/L en el porcentaje de remoción de dióxido de carbono y en la oxigenación del agua manteniendo la geometría interna de la torre.

Como se puede observar en la Figura 51 el aumento de la relación G/L incrementa el porcentaje de remoción de dióxido de carbono; para cumplir el objetivo de la empresa es necesario como mínimo una relación G/L de 10 si se mantiene la geometría interna de la torre, la cual fue determinada en el capítulo 4.

Figura 51.

Análisis paramétrico del dióxido de carbono

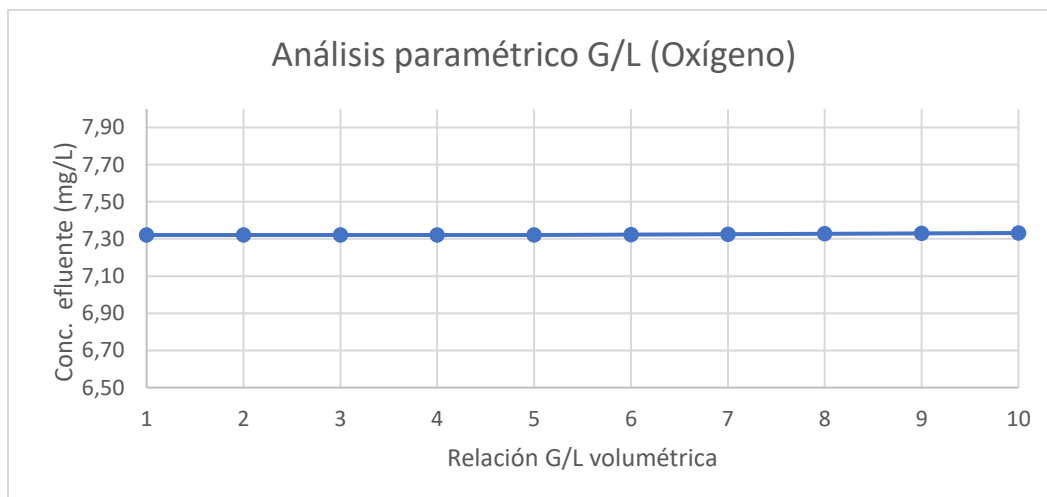


Nota. Análisis paramétrico del dióxido de carbono.

Por parte de la oxigenación del agua de cultivo la relación G/L no genera cambios significativos en la concentración de oxígeno disuelto en el efluente debido a que, como se mencionó anteriormente, la concentración de saturación de oxígeno en el agua se logra usando una relación G/L menor a 1. Los resultados de ese análisis paramétrico se reflejan en la Figura 52.

Figura 52.

Análisis paramétrico del oxígeno



Nota. Análisis paramétrico del oxígeno.

Del análisis anteriormente realizado se concluye que con los datos de altura y diámetro establecidos en el capítulo 4 la relación G/L mínima para cumplir con los objetivos de la empresa es de 10.

6. COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN

En este capítulo se determinarán los costos generales del equipo para realizar el proceso de aireación y desgasificación en el cultivo semi intensivo de tilapias en la empresa Lucarvel.

6.1 Inversión inicial

La inversión inicial se refiere al costo de los equipos necesarios para el funcionamiento de la torre empacada, esta se puede observar en la Tabla 25.

Tabla 25.

Precio de los equipos

<i>Equipo</i>	<i>Marca</i>	<i>Modelo</i>	<i>Precio unitario (COP)</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio total (COP)</i>	<i>Fuente</i>
Bomba centrífuga	Aqua Pak	Altra 10-1230	\$ 1.246.262	0	\$ 0	Fibras & Normas de Colombia
Blower	Pumpower	PW-4311	\$ 1.904.000	1	\$ 1.904.000	Imporbombas
Empaque	Aquaintegral	Pall Rings PP (25mm)	\$ 2.800.000	0,1	\$ 295.255	Aquaintegral
Tanque	Jiangsu Zhengheng		\$ 365.450	1	\$ 365.450	Alibaba
Distribuidor de líquido	Pingxiang Tiansheng		\$ 182.725	1	\$ 182.725	Alibaba
Eliminador de arrastre	Raoyang County	RH--22	\$ 255.815	1	\$ 255.815	Alibaba
Soporte de empaques	Pingxiang Tiansheng		\$ 548.175	1	\$ 548.175	Alibaba
TOTAL					\$ 3.551.420	

Nota. Precio de los equipos necesarios para el proceso de aireación y desgasificación.

El precio total determinado incluye el costo de importación de los equipos, sin embargo, no se detalla el valor específico del arancel.

Los proveedores venden como mínimo 1 m³ de empaque, para los Pall Rings de 25 mm de polipropileno el m³ tiene un costo de \$2.800.000, sin embargo, cada equipo

necesita 0,1 m³ por lo que en la inversión inicial se tiene en cuenta un costo proporcional a la cantidad necesaria.

Los equipos que fueron cotizados en Alibaba tienen precios aproximados debido a las dimensiones específicas que tiene el diseño propuesto; por otro lado, la bomba centrífuga se tiene en cuenta, pero no entra en la inversión inicial porque la empresa ya cuenta con este equipo en sus instalaciones.

6.2 Costo de operación

En los costos de operación se deben tener en cuenta los gastos asociados a la parte operacional y al personal necesario para mantener el proceso

6.2.1 Costos de personal

Tabla 26.

Nómina para el proceso de cultivo de tilapias

BÁSICO		PRESTACIONES		
<i>Salario básico</i>	<i>Auxilio de transporte</i>	<i>Salud (8,5%)</i>	<i>Pensión (12%)</i>	<i>ARL I (0,512%)</i>
\$ 1.200.000	\$ 106.454	\$ 102.000	\$ 144.000	\$ 6.264
OTROS				
<i>Prima</i>	<i>Cesantías</i>	<i>Intereses de cesantías (1%)</i>	<i>Vacaciones</i>	<i>Horas extra</i>
\$ 100.000	\$ 100.000	\$ 1.000	\$ 50.000	\$ 121.136
TOTAL				\$ 1.930.854

Nota. Nómina del trabajador en la empresa Lucarvel.

La empresa Lucarvel cuenta con un trabajador para el mantenimiento de los estanques en donde se realiza el cultivo de tilapias; sus labores incluyen la limpieza de los estanques cada 3 días, la alimentación de los peces y la toma de muestras al comienzo y al finalizar la jornada laboral.

El salario básico del operario consiste en un salario base de 1.200.000 más las prestaciones reglamentarias por ley, así mismo el pago de horas extra los días que se considere necesario.

La jornada laboral consta de 8 horas diarias de lunes a sábado y 4 horas los domingos.

Mensualmente la empresa debe reservar \$1.930.854 pesos para el pago de los servicios del operario que va a estar a cargo de la operación.

6.2.2 Costos operacionales

Los costos asociados al funcionamiento de la torre de aireación y desgasificación son los asociados al consumo energético del proceso.

En primer lugar, se determina el tiempo que va a permanecer el equipo encendido, para ello se tiene en cuenta la alta densidad de peces en el estanque y la Figura 18 en donde se establece la concentración de dióxido de carbono a lo largo del tiempo.

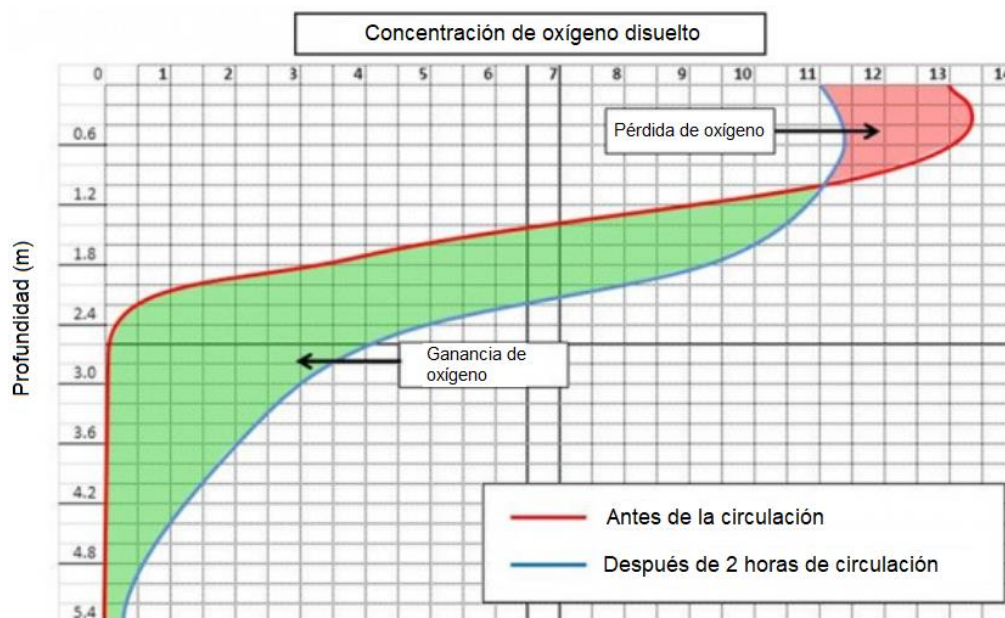
De acuerdo con los datos analizados se precisa mantener la torre encendida las 24 horas del día debido al alto nivel de producción de dióxido de carbono provocado por la respiración y otros procesos metabólicos de los peces.

El mantener la torre encendida trae otra ventaja al proceso, el movimiento del agua provocado por la corriente proveniente de la torre es beneficioso para la salud de los peces.

El agua en los sistemas de producción acuícola debe ser mezclada por el viento y en sistemas intensivos a través de medios mecánicos. [49] La circulación del agua es una estrategia eficaz para mezclar las aguas superficiales con altos niveles de oxígeno con aguas de fondo con bajo contenido de oxígeno [50], para así evitar la saturación de oxígeno en un solo punto del tanque y distribuirlo uniformemente.

Figura 53.

Perfil de oxígeno en un estanque con corrientes de agua



Nota. Concentración de oxígeno disuelto antes y después de la circulación del agua. Tomado de: Global Aquaculture Alliance, “La correcta circulación del agua en los estanques”, [En línea]. Disponible: <https://cutt.ly/XnGAL0S> [Acceso 14 jun, 2021]

De acuerdo con el tiempo que permanecen los equipos encendidos se calcula el costo mensual asociado al consumo energético de los equipos, teniendo en cuenta el valor de la energía eléctrica presentado en el capítulo 2.

Tabla 27.

Consumo energético del proceso

<i>Equipo</i>	<i>Consumo (kW)</i>	<i>Tiempo de operación (h)</i>	<i>Consumo diario (kWh)</i>	<i>Consumo mensual (kWh)</i>	<i>Costo</i>
Bomba centrífuga	0,75	24	18	540	\$ 285.795
Blower	0,90	24	21,6	648	\$ 342.954
TOTAL					\$ 628.749

Nota. Gastos asociados al consumo energético de los equipos en la operación de la torre empacada.

6.2.3 Disminución de recambios

Con la aplicación de la alternativa diseñada la empresa Lucarvel va a tener la ventaja de disminuir los recambios de agua que hace a la semana.

Actualmente, como se había mencionado en el capítulo 2, se realiza un recambio diario para controlar los gases disueltos en el agua de cultivo; con la aplicación de la alternativa esta cantidad disminuye a un recambio semanal que se llevará a cabo el mismo día que se realiza la limpieza del estanque, generando una disminución aproximada del 83% en los recambios.

Hablando en términos económicos esta disminución representa un ahorro de aproximadamente 5 millones y medio como se puede observar en la Tabla 28.

Tabla 28.

Costo de los recambios al aplicar la alternativa diseñada

Valor acueducto (\$/m ³)	\$ 2.347
--------------------------------------	----------

<i>D (m)</i>	<i>Cantidad de tanques</i>	<i>Volumen (m³)</i>	<i>Volumen de recambio (m³)</i>	<i>Recambios mensuales</i>	<i>Valor total (Recambios diarios)</i>
5	5	19,63	9,82	5	\$ 576.188,50
9	6	63,62	31,81	5	\$ 2.239.742,10
12	4	113,1	56,55	5	\$ 2.654.457,00
TOTAL MES					\$ 5.470.387,60

Nota. Costo de los recambios de agua cuando se aplica la torre de aireación y desgasificación.

CONCLUSIONES

Se determinó que el agua de cultivo de la empresa Lucarvel presentaba problemas en cuanto a la concentración de dióxido de carbono disuelto, presentando un valor de 30 mg/L siendo requerido un valor menor a 20 mg/L para el funcionamiento óptimo del proceso.

Existen diversas alternativas para el control de los gases disueltos en la industria piscícola, sin embargo, las alternativas que presentan un mejor desempeño en el proceso de desgasificación son la torre de bandejas y la torre empaquetada.

La selección de la torre empaquetada por medio de la matriz de decisión evidenció que para el proceso en cuestión es la mejor opción debido a su alta eficiencia en la eliminación del dióxido de carbono, siendo un equipo con una eficiencia de remoción aproximada del 40% y requiriendo un mantenimiento sencillo para su funcionamiento.

Se verificó que el comportamiento teórico del equipo diseñado es similar al obtenido a través del programa de simulación Aspen Plus 11, teniendo en cuenta el paquete termodinámico NRTL y la ley de Henry.

Teniendo en cuenta los resultados de la simulación se comprobó que el dimensionamiento del equipo es el adecuado y puede ser aplicado en el proceso de cultivo de tilapias.

El costo de implementación del equipo diseñado es 3.551.420 COP; adicionalmente el mantenimiento mensual de este le genera a la empresa un costo de 2.559.603 COP por conceptos de gasto energético y mano de obra.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A.-F. M. El-Sayed, *Tilapia Culture*, Academic Press , 2019.
- [2] A. Montoya López, C. Moreno Arias, A. Tarazona Morales, M. Olivera Angel y J. Betancur, «Body shape variation between farms of tilapia (*Oreochromis* sp.) in Colombian Andes using landmark-based geometric morphometrics,» *Latin american journal of aquatic research*, vol. 47, nº 1, p. 23, 2019.
- [3] D. DeLong, T. Losordo y J. Rakocy , «Tank Culture of Tilapia,» *Southern Regional Aquaculture Center*, nº 282, p. 8, 2009.
- [4] L. Towers, «The Fish Site,» 1 Noviembre 2005. [En línea]. Available: <https://thefishsite.com/articles/tilapia-life-history-and-biology#:~:text=Tilapia%20are%20shaped%20much%20like,dorsal%20fin%20is%20heavily%20spined..> [Último acceso: 12 Febrero 2020].
- [5] S. Craig y L. Helfrich, «Understanding Fish Nutrition, Feeds, and Feeding,» Virginia Cooperative Extension, Maryland, 2017.
- [6] M. A. Saavedra Martinez, «Manejo del cultivo de tilapia,» USAID, Hawai, 2006.
- [7] Portafolio, «El mercado nacional de pescado es de 350.000 toneladas,» *Portafolio*, p. 1, 11 Abril 2019.
- [8] Portafolio, «Exportaciones de tilapia a EE.UU.: Colombia multiplica sus peces,» 12 Octubre 2020. [En línea]. Available: <https://www.portafolio.co/economia/exportaciones-de-tilapia-a-ee-uu-colombia-multiplica-sus-peces-545553>. [Último acceso: 14 Febrero 2021].
- [9] M. C. Palacio Lara y D. M. Mesa Tabares, «Producción Acuicola,»

Bancolombia, Bogotá D.C, 2020.

- [10] E. D. Balbuena Rivarola, «Manual básico de sanidad piscícola,» FAO , Asunción, 2011.
- [11] S. Hsien-Tsang y M. Quintanilla, «Manual sobre reproducción y cultivo de tilapia,» Centro de desarrollo de la pesca y la agricultura, El Salvador, 2008.
- [12] M. C. Merino Archila, G. Salazar Ariza y D. Gómez León, «Guía práctica de la piscicultura en Colombia,» Instituto Colombiano del Desarrollo Rural, Bogotá , 2006.
- [13] J. M. López Bejarano, «Cómo el cultivo de la tilapia se ha encargado del crecimiento de la piscicultura,» La República, Bogotá , 2019.
- [14] C. Webster, Tilapia: Biology, Culture and Nutrition, Food Product Press, 2006.
- [15] M. Timmons, T. Guerdat y B. Vinci, Recirculating aquaculture, New York: Ithaca publishing Company, 2018.
- [16] D. E. Hoyos Martinez, «EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LA RETENCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN LOS ESTANQUES DEL CULTIVO DE TRUCHA SOBRE LA CALIDAD FISICOQUÍMICA DEL AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE PECES,» UNIVERSIDAD DEL VALLE, Cali, 2011.
- [17] J. S. Fernández Murillo, «Propuesta para el sistema de tratamiento de agua residual del proceso de nitruración en la empresa aluica S.A,» Fundación Universidad de América, Bogotá D.C, 2018.
- [18] F. F. Chavez Gonzales y E. Alban Colonia, «DISEÑO TEORICO Y SELECCIÓN GENERAL DE TORRES DE ENFRIAMIENTO DE TIRO MECÁNICO,» CORPORACIÓN UNIVERSITARIA AUTONOMA DE OCCIDENTE, Cali, 1995.

- [19] H. G. Maldonado Quimi , «Diseño de planta de tratamiento de agua potable para el sitio El Recuerdo por el método de aireación y filtración,» Universidad técnica de Machala, Machala, 2015.
- [20] E. Salazar, «OPERACIONES UNITARIAS PARA INGENIERIA INDUSTRIAL,» UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO, Caracas, 2000.
- [21] D. F. Ospina Gomez y A. F. Orjuela Barrero, «PROPUESTA PARA UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE AGUA SUBTERRANEA PARA LA FINCA LAS BRISAS EN NEMOCÓN, CUNDINAMARCA,» Fundación Universidad de América, Bogota, 2019.
- [22] L. Martín Burillo y L. García Nieto, «La reacción de la metanación,» Escuela Universitaria Ingeniería Técnica Industrial , Zaragoza, 2010.
- [23] Condorchem envitech, «DESGASIFICACIÓN TÉRMICA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS DE PROCESO PARA CALDERAS,» Condorchem envitech, Madrid.
- [24] I. Ahmad, A. M. Babitha Rani, A. K. Verma y M. Maqsood, «Biofloc technology: an emerging avenue in aquatic animal healthcare and nutrition,» *Aquacult Int*, vol. 25, p. 12, 2017.
- [25] E. D. P. Varela Bravo, «Efecto de dos tecnologías (biofloc y recirculación de agua), aplicadas en la crianza de vieja azul,» Universidad técnica estatal de quevedo, Los Ríos, 2020.
- [26] J. Holt y D. Hendricks Bergey, *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, Lippincott, Williams & Wilkins , 1993.
- [27] A. Bernhard, «The nitrogen cycle: Processes, Players, and Human Impact,» *Nature Education*, vol. 2, nº 12, p. 9, 2010.
- [28] Fondo nacional del desarrollo pesquero, «MANUAL DE CULTIVO DE

TILAPIA,» Agencia Española de Cooperación Internacional, Lima, 2004.

- [29] S. Burge, «The Systems Engineering Tool Box,» Burge Hughes Walsh, London, 2009.
- [30] R. Gonzales, «PDCAHome,» 20 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <https://www.pdcahome.com/2569/matriz-de-pugh-ayuda-a-la-toma-de-decisiones/>. [Último acceso: 20 Marzo 2021].
- [31] A. A. Perpiñan Guerra, «Metodología para la evaluación y selección de alternativas de aprovechamiento, ahorro y uso eficiente del agua en el sector institucional,» Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 2013.
- [32] E. Arce Medina, «Introducción al diseño básico de los procesos químicos,» Instituto politécnico nacional, Ciudad de México, 2011.
- [33] A. Comseaña Campos, «Metodología para la generación y selección de alternativas de diseño considerando múltiples factores de un modo holístico,» Universidad de Vigo, Vigo, 2013.
- [34] R. Treybal, Operaciones de transferencia de masa, New York: McGrawHill, 2000.
- [35] A. Nieto, «Torres de enfriamiento,» Mundo HVACR, Ciudad de México, 2019.
- [36] E. J. Morales Ramirez y G. Perez Sandoval, «COMPORTAMIENTO DE LA ABSORCIÓN EN COLUMNAS EMPACADAS EN RELACIÓN A LA TEMPERATURA Y LA CARGA ESPECIFICA,» ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA QUIMICA E INDUSTRIAS EXTRACTIVAS, Ciudad de México, 2015.
- [37] B. H. Lapizco Encinas , «DESTILACIÓN CON EMPAQUE ESTRUCTURADO: ESTUDIO EXPERIMENTAL DE DISTRIBUCIÓN DEL

LÍQUIDO,» INSTITUTO TECNOLÓGICO DE CELAYA, Celaya, 1998.

- [38] BOEGGER, «Structured Packing – Metal, Ceramic or Plastic in Plate and Wire Gauze Type,» [En línea]. Available: <https://www.structuredpacking.org/structured-packing/structured-packing.html>. [Último acceso: 24 Mayo 2021].
- [39] C. Linares Rosales, «ESTUDIO DE CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA TORRE DE DESTILACIÓN DE EMPAQUE AL AZAR DE LA NAVE 1000 DEL LEM DE INGENIERIA QUÍMICA,» UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MÉXICO, Ciudad de México, 2016.
- [40] BESORAS, «ANILLOS TIPO PALL RELLENO PARA TORRES,» BESORAS, Buenos Aires.
- [41] S. Summerfelt, B. Vinci y R. Piedrahita, «Oxygenation and carbon dioxide control in water reuse systems,» Aquacultural engineering, New York, 2000.
- [42] NIST, «NIST,» [En línea]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389&Mask=10>. [Último acceso: 22 Mayo 2021].
- [43] J. Crittenden, R. Trussell, D. Hand, K. Howe y G. Tchobanoglous, MWH Water Treatment: Principles and design, New Jersey: WILEY, 2012.
- [44] S. Karunaratne, D. Eimer y L. Erik, «Model Uncertainty of Interfacial Area and Mass Transfer Coefficients in Absorption Column Packings,» University College of Southeast Norway, Tel-Tek.
- [45] A. Pérez Sánchez, E. Pérez Sánchez y R. Segura Silva, «DESIGN OF A PACKED-BED ABSORPTION COLUMN CONSIDERING FOUR PACKING TYPES AND APPLYING MATLAB,» Universidad Nacional de Ingeniería, Managua, 2016.

- [46] J. Staudinger, «Evaluation of mass transfer correlations for packed column air stripping of volatile organic contaminants from water supplies,» Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg , 1986.
- [47] G. Hackney, «The performance and design of packed column aereation systems for aquaculture,» Aquacultural Engineering, 1982.
- [48] H. J. De la Hoz Siegler, «DISEÑO DE UN MÓDULO PARA EL DIMENSIONAMIENTO HIDRÁULICO DE TORRES EMPACADAS,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá , 2003.
- [49] C. Boyd, «Por qué la mezcla y el movimiento del agua es clave en los sistemas acuicolas,» Global Aquaculture Alliance, 2018.
- [50] F. Kubitza, «La correcta circulación del agua en los estanques, Parte 2,» Global Aquaculture Alliance, 2016.
- [51] Superintendencia financiera de Colombia, «Tasa de cambio representativa del mercado,» Banco de la Republica, Bogotá D.C, 2021.
- [52] M. A. Rodriguez Peña, «En consumo de pescado, Colombia aspira la media de América Latina,» *Vanguardia*, p. 1, 16 Abril 2019.
- [53] Presidencia de la República, «Presidencia de la República,» 3 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://id.presidencia.gov.co/Paginas/prensa/2020/Mas-de-28-mil-toneladas-de-pescado-estaran-disponibles-en-el-pais-para-esta-Semana-Santa-200403.aspx#:~:text=Bogot%C3%A1%2C%20de%20abril%20de%202020.&text=Se%20espera%20que%20en%20esta%20temporada%20se>. [Último acceso: 19 Febrero 2021].
- [54] R. Rios, «Cartilla práctica para el cultivo de tilapia,» Ministerio de economía y finanzas y la agencia española de cooperación internacional para el desarrollo, Ciudad de Panamá , 2012.

- [55] J. A. Hargreaves, «Biofloc Production System for Aquaculture,» *Southern Regional Aquaculture Center*, nº 4503, p. 12, 2013.
- [56] J. P. Rojas Hanco , «Determinación de la eficiencia de las bacterias nitrosomonas y nitrobacter para remover concentraciones de amonio, ion nitrito e ion nitrato en agua del río Torococha a distintos niveles de pH y temperatura,» Universidad peruana unión, Juliaca, 2018.
- [57] J. A. Harrison, «El ciclo del nitrógeno: De microbios y de hombres,» *Visionlearning* , Vols. %1 de %2EAS-2, nº 4, p. 1, 2003.
- [58] A. León Valencia, «Proyecto de factibilidad para la creación de una microempresa dedicada al cultivo y comercialización de tilapia al mercado de los Estados Unidos ubicada en la parroquia de Mindo, Cantón San Miguel de los Bancos,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2009.
- [59] Hanna Instruments, «Monitoreo de agua en piscicultura,» Hanna Instruments, Bogotá, 2019.
- [60] A. E.-B. Mohamed, «Volatile organic chemicals removal from contaminated water using air stripping low profile sieve tray towers,» Tripoli University, Estambul, 2012.
- [61] V. Castillo, G. Blazquez y A. Ronda, «Scale-up of a packed bed column for wastewater treatment,» *Water Science and Technology* , Granada, 2018.
- [62] M. Kavanaugh y R. Trussell, «Design of aeration towers to strip volatile contaminants from drinking water,» *Research and Technology*, Washington , 1980.
- [63] W. A. Lozano Rivas y G. Lozano Bravo, *Potabilización del agua: Principios de diseño, control de procesos y laboratorio*, Bogotá: Universidad piloto de Colombia, 2015.

- [64] D. A. Chavarro Rodriguez, «DISEÑO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE DE 2 LTS/S PARA UNA POBLACIÓN DE 750 HABITANTES,» Universidad Militar Nueva Granada, Bogota, 2014.
- [65] M. A. Núñez Camacho, «DEFINICIÓN DE OPCIONES DE MEJORA EN UNA PLANTA DE AGUA POTABLE,» Universidad central de Ecuador, Quito, 2015.
- [66] J. A. Romero Rojas, POTABILIZACIÓN DEL AGUA, México D.F: Alfaomega, 1999.
- [67] C. Castillo, «PROPUESTA DE MEJORAMIENTO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE Y RESIDUAL EN LA EMPRESA PALMAS DEL CESAR,» Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2018.
- [68] R. F. Calderon Muñoz, S. d. P. Forero Poveda y A. Suarez Cerquera, «Implementación de un diseño piloto de bandejas de aireación para aguas, potencializado con microorganismos eficientes,» Universidad EAN, 2012, 2012.
- [69] J. Rabat Blázquez y A. Trapote Jaume, «Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración,» Universidad de Alicante, Alicante, 2016.
- [70] Ministerio de Desarrollo económico , «REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO RAS 2000,» Dirección de agua potable y saneamiento, Bogota, 2000.
- [71] AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION , WATER TREATMENT PLANT DESIGN, Estados Unidos: McGrawHill, 1990.
- [72] V. G. Guerrero Bermeo, «DISEÑO DEFINITIVO DE LA ALTERNATIVA OPTIMA DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE EN LA REGION COSTA,» Universidad técnica de Machala, Machala, 2015.

- [73] B. P. Lárraga Jurado, «DISEÑO DEL SISTEMA DE AGUA POTABLE PARA AUGUSTO VALENCIA, CANTON VICES, PROVINCIA DE LOS RIOS,» Pontificia universidad catolica del Ecuador, Quito, 2016.
- [74] D. E. Mellado Ayala, J. Perez y M. I. Rivas Roca, «REPORTE TORRE EMPACADA,» UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, Guatemala, 2015.
- [75] Y. Delgado, A. Rojas, M. Trujillo y J. Rodriguez, «Diseño y evaluación hidrodinámica de una minicolumna empacada,» CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL NIQUEL.
- [76] R. Thiruchelvan, «Design Chlorine Absorption Colum,» Universiti Teknologi PETRONAS, Perak, 2019.
- [77] N. Nirmalakhandan, Y. Lee y R. Speece , «Designing a Cost-Efficient Air-Stripping Process,» American Water Works Association, New York, 1987.
- [78] J. Colt, B. Watten y T. Pfeiffer, «Carbon dioxide stripping in aquaculture. Part 1: Terminology and reporting,» Aquacultural engineering, 2012.
- [79] B. Anvaripour , N. Yoswathana, N. Ashton y A. Arrowsmith, «Stripping ethanol and acetone from water with modern packings,» The university of Birmingham, Birmingham, 1995.
- [80] D. Karimi , Eding , A. Aarnink y K. Groot , «The effect of gas to liquid ratio on carbon dioxide removal and heat loss across a forced ventilated trickling filter,» Wageningen University, Wageningen, 2020.
- [81] J. Thom y W. Byers, «Limitations and Practical use of a Mass transfer model for predicting air stripper performance,» Environmental Progress, Corvallis.
- [82] T. Espinoza Paz y C. Rodriguez, «Determination of water quality index (WQI) of Morón river and Patanemo river of Carabobo state in Venezuela,»

Universidad de Carabobo, Carabobo, 2016.

- [83] N. Collado , A. García , M. Janer, D. Quezada y R. Parra , «Planta de producción de MCB,» Universitat Autònoma de Barcelona, Barcelona, 2017.
- [84] J. I. Torregrosa López, «Conceptos básicos de simulación de procesos,» Universitat Politècnica de Valencia, Valencia.
- [85] Y. O. Vicente Morales , «Aplicación del Aspen Plus en el análisis de la integración energética en la papelera Damují,» Universidad central de las Villas, Santa Clara, 2008.
- [86] C. M. Cortez de la O, N. A. Saballos Sánchez y F. M. Sorto Merino, «Aplicación del programa "COCO SIMULATOR" en la simulación de componentes de procesos de industrias químicas en El Salvador, como una herramienta didáctica para la ingeniería química.,» Universidad de El Salvador, San Salvador, 2017.
- [87] E. Carlson, «Do not gamble with physical properties for simulations,» Chemical Engineering Progress, Berkeley, 1996.

ANEXOS

ANEXO 1

RECOMENDACIONES

Se recomienda incluir modelos que permitan predecir la producción de dióxido de carbono en el cultivo semi intensivo de tilapias con el fin de desarrollar un modelo dinámico que sea más acorde a la realidad del proceso.

La humedad relativa y la temperatura variable del lugar deben de tenerse en cuenta en el desarrollo del modelo matemático para el diseño del equipo.

Llevar a cabo el proceso en la parte experimental es importante para determinar si el diseño propuesto cumple con el objetivo en el cultivo de tilapias que lleva a cabo la empresa Lucarvel.

La implementación del diseño propuesto se deja en manos de la empresa Lucarvel.