

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE LA
APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ULTRAFILTRACIÓN PARA EL REUSO
DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR
ALIMENTICIO, MEDIANTE EL USO DE UN PILOTO CON MEMBRANA.**

JULIAN ALBERTO ANGARITA MORA

BRAYAM SMITH ROJAS NOY

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019**

**EVALUACIÓN DE LA VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA DE LA
APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS DE ULTRAFILTRACIÓN PARA EL REUSO
DE AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL EN UNA EMPRESA DEL SECTOR
ALIMENTICIO, MEDIANTE EL USO DE UN PILOTO CON MEMBRANA.**

JULIAN ALBERTO ANGARITA MORA

BRAYAM SMITH ROJAS NOY

Proyecto integral de grado para optar al título de

INGENIERO QUÍMICO

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2019**

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá, Febrero 2019

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del claustro

Dr. Jaime Posada Díaz

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. Luis Jaime Posada García Peña

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. Ana Josefa Herrera Vargas

Decano de Facultad

Dr. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director Programa Ingeniería Química

I.Q. Leonardo de Jesús Herrera Gutiérrez

La Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios de ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	19
INTRODUCCIÓN	20
OBJETIVOS	21
1. MARCO TEÓRICO	21
1.1 FILTRACIÓN	21
1.2 ULTRAFILTRACIÓN	21
1.3 PRE-FILTRACIÓN	22
1.4 COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN	23
1.5 MEMBRANA UF	23
1.5.1 Liqui-Flux W05	23
1.5.2 Funcionamiento de la membrana	24
1.5.3 Dirección del flujo	24
1.6 CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN Y REQUISITOS DEL TRATAMIENTO PREVIO	24
1.7 CONDICIONES GENERALES DE ALIMENTACIÓN	25
1.8 CALIDAD TÍPICA DEL AGUA FILTRADA	25
1.9 PRESIÓN TRANSMEMBRANA	25
1.10 MANTENIMIENTO DE LA MEMBRANA	26
1.11 ÁREAS DE APLICACIÓN UF	27
1.11.1 Pre-tratamiento para sistemas de OI y NF	27
1.11.2 Agua potable	28
1.11.3 Reutilización de agua residual industrial	28
1.11.4 Agua de proceso	28
1.12 MARCO LEGAL	29
2. DIAGNOSTICO	30
2.1 ANÁLISIS PESTAL	30
2.1.1 Político	30
2.1.2 Económico	31
2.1.3 Social	33
2.1.4 Tecnológico	35
2.1.5 Ambiental	36
2.1.6 Legal37	
2.2 PLANTA	37
2.3 CAUDAL	40
2.4 FUNCIONAMIENTO PTAR	40
2.5 AGUA ESPERADA POR LA EMPRESA	41
2.6 LIMITES OPERATIVOS DEL SISTEMA UF	45
2.7 CONDICIONES DE ENTRADA A LA MEMBRANA	45

3.	PUESTA EN MARCHA	47
3.1	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN	47
3.2	CONSIDERACIONES IMPORTANTES	47
3.2.1	Equipos principales	47
3.2.2	Diseño Interior del Módulo Liqui-Flux	48
3.2.3	Diseño Exterior del Módulo Liqui-Flux	49
3.2.4	Conexión Variable	49
3.3	OPERACIÓN MÓDULOS	49
3.3.1	Limpieza Especial (CIP)	50
3.3.2	Proceso de limpieza in situ (CIP)	51
3.4	INSTALACIÓN EN LA PLANTA	51
3.5	PROCEDIMIENTO DE PARADA DEL SISTEMA	51
3.6	FUNCIONAMIENTO	52
3.7	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN	54
3.7.1	Flujo cruzado	55
3.7.2	Modo dead-end	56
3.8	CAPACITACIONES	57
3.8.1	Selección de bombas	57
3.8.2	Productos químicos en membranas	57
3.9	MONTAJE	57
4.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	60
4.1	DISEÑO DE EXPERIMENTAL # 1	60
4.2	DISEÑO EXPERIMENTAL	63
4.3	DESARROLLO EXPERIMENTAL # 1	66
4.3.1	Aforación	66
4.3.2	Retrolavado	67
4.3.3	Enjuague	67
4.4	DESARROLLO	68
4.4.1	Sin Coagulante	68
4.4.2	1 ppm de coagulante	68
4.4.3	2 ppm de coagulante	69
4.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTO #1	70
4.5.1	Sin coagulante	70
4.5.2	1 ppm de coagulante	72
4.5.3	2 ppm de coagulante	73
4.6	ANÁLISIS FINAL	74
4.7	DESARROLLO EXPERIMENTAL # 2	75
4.7.1	Toma de muestras	75
4.7.2	Aforar	76
4.7.3	Retrolavado	77
4.7.4	Enjuague	78
4.8	EXPERIMENTACIÓN	80

4.8.1	Flujo recomendado	84
4.8.2	Variación de flujo 80 L/m ² h	82
4.8.3	Variación de flujo 100 L/m ² h	83
4.9	ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTO # 2	83
4.9.1	Flujo recomendado 57 L/m ² h	83
4.9.2	Variación flujo 80 L/m ² h	85
4.9.3	Variación flujo 100 L/m ² h	87
4.10	ANÁLISIS FINAL EXPERIMENTO 2	89
5.	PROPUESTA ESCALA INDUSTRIAL	90
5.1	INSTALACIÓN	90
5.1.1	Planta	90
5.2	RECOMENDACIONES DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA	92
5.3	RECOMENDACIONES	93
5.4	OPERACIÓN NORMAL	93
5.5	LIMPIEZA ESPECIAL (CIP)	94
5.5.1	Lavado con agua:	94
5.5.2	Limpieza ácida	95
5.6	PRUEBA DE INTEGRIDAD	95
5.7	REGISTRO DE DATOS DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS	95
5.8	PROCEDIMIENTOS DE PARADA DEL SISTEMA	96
5.9	DIAGRAMA	96
5.10	CONDICIONES DE OPERACIÓN SEGÚN RESULTADOS OBTENIDOS	97
6.	PROPUESTA FINANCIERA	99
6.1	VARIABLES	99
6.1.1	Inversión	99
6.1.2	Costos	99
6.1.3	Gastos	99
6.1.4	Análisis	99
6.2	VARIABLES ECONÓMICAS DEL PROCESO	100
6.2.1	Costo de agua	100
6.2.2	Costos Iniciales	100
6.2.3	Mantenimiento	101
6.2.4	Operación	101
6.2.5	Problemas Frecuentes	101
6.3	ESTUDIO DE COSTOS DE EQUIPOS	102
6.4	COSTOS DE PERSONAL	105
6.5	INVERSION INICIAL	108
6.6	FLUJO DE CAJA	108
6.6.1		110
6.6.2	Costos	110
6.7	INDICADORES	114

6.8	RELACIÓN BENEFICIO-COSTO	115
7.	RECOMENDACIONES	118
8.	CONCLUSIONES	117
	BIBLIOGRAFIA	119
	ANEXOS	123

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1 Quesería	38
Figura 2 Planta	38
Figura 3. Agua residual	39
Figura 4. Muestra 1	39
Figura 5. Interior membrana	48
Figura 6. Conexión de un módulo radial	49
Figura 7. Membrana	52
Figura 8. Funcionamiento	53
Figura 9. Cross flow	55
Figura 10. Dead-end	56
Figura 11. Piloto	58
Figura 12. Aforación	66
Figura 13. Retrolavado	67
Figura 14. Salida PTAR	75
Figura 15. Toma de muestra	76
Figura 16. Retrolavado experimental	77
Figura 17. Enjuague	78
Figura 18. Bomba utilizada	79
Figura 19. Puesta en marcha	80
Figura 20. Turbidez inicial	81
Figura 21. Sistema de membranas	92
Figura 22. Conectores	93

LISTA DE DIAGRAMAS

	pág.
Diagrama 1. Proceso de filtración	22
Diagrama 2. Funcionamiento PTAR	41
Diagrama 3. Ultrafiltración	54
Diagrama 5. Componentes	59
Diagrama 6. Condiciones industriales	97

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1.Comportamiento del PIB por Ramas de Actividad Económica 2018	32
Tabla 2. Variación porcentual por ramas de actividad.	32
Tabla 3. Población colombiana	34
Tabla 4. Caudal PTAR	40
Tabla 5.Agua esperada	42
Tabla 6. Continuación tabla 5	43
Tabla 7.Caracterización	44
Tabla 8. Límites de operación	45
Tabla 9. límites de operación	47
Tabla 10. Límites para limpieza	50
Tabla 11. Características de la membrana	53
Tabla 12. Variables y constantes	60
Tabla 13. Variable respuesta	61
Tabla 14. Variables manipuladas	61
Tabla 15. Diseño experimental	62
Tabla 16. Tabla experimental	63
Tabla 17. Variables respuesta 2	64
Tabla 18. Variables manipuladas 2	64
Tabla 19. Diseño experimental	65
Tabla 20. Posibilidades 2	65
Tabla 21. Resultados sin aplicar coagulante	68
Tabla 22. Diseño experimental 1ppm	68
Tabla 23. Continuación tabla 22	69
Tabla 24. Diseño experimental 2ppm	69
Tabla 25. Promedio experimentación y replica sin coagulante	71
Tabla 26. Comparación calidad	71
Tabla 27. Promedio experimentación 1ppm	72
Tabla 28. Comparación calidad	73
Tabla 29. Promedio experimentación y replica 2ppm	73
Tabla 30. Comparación calidad	74
Tabla 31. Aforación	80
Tabla 32. Experimento 1 57 L/m ² h	81
Tabla 33. Flujo inicial 2 80 L/m ² h	82
Tabla 34. Flujo inicial 3 100 L/m ² h	83

Tabla 35. Promedio flujo 57	84
Tabla 36. Comparación calidad	84
Tabla 37. Promedio flujo 80	86
Tabla 38. Calidad flujo 80	86
Tabla 39. Promedio flujo 100	88
Tabla 40. Calidad flujo 100	88
Tabla 41. Agua esperada	98
Tabla 42. Costo de equipos	102
Tabla 43. Costos de instrumentación	103
Tabla 44. Costos hidráulicos	104
Tabla 45. Resumen costos de equipos	104
Tabla 46. Personal para conexión	105
Tabla 47. Costo ingenieril	106
Tabla 48. Costos operacionales	107
Tabla 49. Resumen costos de personal	107
Tabla 50. Flujo de caja	108
Tabla 51. Costo de agua	109
Tabla 52. Costos adicionales	113
Tabla 53. Resumen costos	114
Tabla 54. Indicadores	114
Tabla 55. VNA	115

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Volumen	67
Ecuación 2. Volumen 2	76
Ecuación 3. Caudal ml/min	82
Ecuación 4. Conversión	82
Ecuación 5. Calculo de flujo	82
Ecuación 6. Cálculo ideal de agua tratada	85
Ecuación 7. Flujo de PTAR	109
Ecuación 8. Agua tratada	109
Ecuación 9. Ingresos anuales	110
Ecuación 10. Flujo de bomba	111
Ecuación 11. Volumen de producto químico	111
Ecuación 12. Volumen según frecuencia de mantenimiento	111
Ecuación 13. Costo del producto químico	111
Ecuación 14. Costo anual	111
Ecuación 15. RBC	115

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Aumento por región	33
Gráfico 2. Comparación concentración	74
Gráfico 3. Comparación 3 flujos	89

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Simulación	123
Anexo B. Modulo W05	127
Anexo C. Piloto	128
Anexo D. 3D Ultrafiltración	129
Anexo E. Planos UD	130
Anexo F. Diagrama P&ID	131

GLOSARIO

ACUMULACIÓN: es la carga de contaminantes y partículas removidas que quedan en el interior de la membrana, afectando de forma directa el flujo y la vida útil de la membrana.

AGUA DE ALIMENTACIÓN: es la corriente a ultrafiltrar, es decir la que se lleva directamente al piloto para realizar el proceso físico.

AGUA ULTRAFILTRADA: corriente de salida en un proceso de ultrafiltración que además cumple con estándares de calidad como turbidez menor a 0,5 NTU

FLUJO: hace referencia al comportamiento de agua ultrafiltrada, permite identificar variables como la acumulación en la membrana.

MEMBRANA: equipo principal en el proceso de ultrafiltración, encargado de aprovechar la presión de un fluido para separar partículas en él suspendidas

PILOTO UF: montaje de un sistema de ultrafiltración a escala piloto, teniendo en cuenta los equipos necesarios como bombas y membrana.

PORCENTAJE DE RECHAZO: es la cantidad de agua que requiere ser recirculada al proceso de ultrafiltración, debido a que en una primera corrida no se logra cumplir con la calidad esperada

PRESION TRANSMEBRANA: presión que generada en el interior de la membrana a la hora de realizar un proceso de ultrafiltración.

RETROLAVADO: proceso que se realiza para mantenimiento de la membrana, el cual consiste en cambiar el flujo de operación con agua ultra filtrada o un componente químico.

TIEMPO UF: hace referencia a la duración que tiene el proceso de ultrafiltración para tratar cierto caudal de agua.

ULTRAFILTRACION (UF): proceso físico de separación que logra la remoción de partículas pequeñas, por ejemplo, proteínas y algunos virus.

RESUMEN

La implementación de un sistema UF (Ultrafiltración) para tratamiento de agua obliga a tener en cuenta diferentes aspectos como: Calidad de agua cruda, puesta en marcha, experimentación y análisis financiero. El diagnóstico de la empresa ubicada en Sopo permitió reconocer los procesos involucrados en su producción, así como los volúmenes de agua necesarios para el cumplimiento de su demanda y los sistemas con los que cuentan para cumplimientos de normas de agua al proceso.

En el capítulo de puesta en marcha se especificó las condiciones necesarias para que un sistema de ultrafiltración pueda funcionar, así como las variables que deben tenerse en cuenta para que el proceso sea eficiente y cumpla con la finalidad esperada, que es eliminar la mayor cantidad de partículas e impurezas del agua. En este capítulo también se habló de los cuidados y limpiezas que deben tener los equipos y en especial la membrana para tener la mayor vida útil posible.

Para la continuación del proyecto se realizó la elección de variables a utilizar, cuáles serán modificadas y cuales permanecerán constantes durante toda la experimentación para lograr los resultados más satisfactorios y que permiten analizar la viabilidad técnica de los sistemas de ultrafiltración en aguas residuales de esta industria alimenticia.

Posteriormente se realizó la experimentación con un piloto el cual verificó que los sistemas de ultrafiltración permiten obtener agua de alta calidad, para ser recirculada al proceso y disminuir el uso de agua para lograr una mayor eficiencia en el proceso.

En el capítulo final se realizó un análisis financiero en el cual se tocaron todos los costos y gastos que incurre el montaje de un sistema de tal magnitud, y el tiempo que se tardará en recuperar la inversión y la disminución de costos de agua que atraerá a la empresa.

Palabras clave: Membrana UF, Agua residual, Tratamiento de agua, viabilidad técnica, piloto UF, sistema de ultrafiltración. Relación beneficio-costos, viabilidad del proceso, industria alimenticia.

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se busca demostrar la viabilidad técnica y financiera de un proceso de ultrafiltración en una empresa del sector alimenticio. La empresa dp Watering SAS (financiadores del proyecto) ve el tratamiento de agua residual industrial como una importante oportunidad de negocio, razón por la cual quiere demostrar a través de pruebas piloto, la funcionalidad de tecnologías de ultrafiltración en este campo.

El desarrollo de pruebas de ultrafiltración (UF) tiene diferentes requerimientos a nivel ingenieril para su correcto desarrollo, de allí que el proyecto se divide en tres grandes fases para su correcta operación.

La primera fase o fase preliminar del proyecto da certeza que el desarrollo del proyecto es viable, debido a que allí se diagnostica cual será el agua a tratar, su procedencia, características físico-químicas del agua, y también se determina si es necesario o no un pre-tratamiento de agua.

El correcto montaje de un piloto UF cuenta con variables de alto peso, las cuales son estudiadas en busca del correcto funcionamiento del piloto UF. Para la puesta en marcha se muestra de forma preliminar y explicativa el funcionamiento de un sistema UF convencional, lo que genera confiabilidad en las pruebas y resultados obtenidos en la prueba piloto, además de incentivar al cliente potencial a implementar esta etapa dentro de su proceso industrial.

La fase más importante del proyecto son las pruebas por medio del piloto, estas permiten realizar análisis y demostrar si técnicamente el proceso es viable para la empresa. Para el desarrollo de las pruebas se realiza una experimentación basada en las variables que se modifican en un proceso UF, demostrando como se puede maximizar la eficiencia del proceso por medio de un control de variables, por ejemplo, el porcentaje de rechazo el cual es un índice importante si se quiere demostrar que el proceso es viable para la corriente de agua a tratar.

La última fase es un análisis financiero que se basa principalmente en el desarrollo de las pruebas, siendo estas las que permiten demostrar que es económicamente viable para la empresa cliente utilizar tecnología de ultrafiltración dentro de su proceso convencional.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la viabilidad técnica y financiera de la aplicación de tecnologías de ultrafiltración para el reúso de agua residual industrial en una empresa del sector alimenticio, mediante el uso de un piloto con membrana.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnosticar el proceso que genera el agua residual a tratar.
- Determinar condiciones de puesta en marcha del piloto con membrana.
- Mencionar las condiciones técnicas y equipos necesarios del proceso a escala industrial.
- Determinar la relación beneficio costo del proceso de recirculado.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 FILTRACIÓN

La filtración como proceso físico tiene diferentes subdivisiones que permiten identificar qué partículas pueden llegar a separar según el proceso utilizado. A continuación, se listan de menor a mayor capacidad de remoción de partículas¹:

- Filtración
- Microfiltración (MF)
- Ultrafiltración (UF) - *Liqui-flux*
- Nanofiltración (NF)
- Ósmosis inversa (OI)

Según esta clasificación general, es importante destacar que para partículas del tamaño menor de 0.02 micras se requiere de OI o NF, debido a que tienen la capacidad de actuar en soluciones salinas acuosas y tinturas sintéticas.¹

Para la remoción de partículas finas se encuentra aplicabilidad de la UF ya que según la calidad de agua que trate puede llegar a ser útil en su potabilización, también se pueden separar partículas con un tamaño molecular relativamente alto como virus y proteínas.

Cada uno de los procesos de separación mencionados requiere de presión, la cual se ve afectada de manera directa con el tamaño de partícula a separar, se requiere menor presión para partículas de un elevado tamaño.¹

Para realizar el montaje y puesta en marcha de un proceso UF hay que tener en cuenta condiciones de calidad de agua para la entrada de la membrana, por ello es importante utilizar procesos como pre-filtrado si es necesario.¹

1.2 ULTRAFILTRACIÓN

La UF es un proceso físico en el cual la presión es fundamental para lograr la separación adecuada dependiendo el uso que se le quiere dar. Para utilizar este método se requiere de membranas semipermeables, las cuales garantizan la remoción de partículas finas y gruesas; entre sus principales aplicaciones se encuentran^{1,2}:

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

- Eliminación de sólidos suspendidos
- Disminución y eliminación (según caso) de COT (Carbón orgánico total), DQO (Demanda química de oxígeno), DBO (Demanda biológica de oxígeno).
- Eliminación de virus y proteínas
- Potabilización de agua
- Reúso de aguas residuales industriales
- Tratamiento de agua en piscinas

En el diagrama 1 se exponen las diferentes aplicaciones de los procesos de filtración convencionales¹.

Diagrama 1. Proceso de filtración



Fuente: ANEJO A. MEMBRANAS: membranas de ultrafiltración Comparativa de ampliación E.D.A.R. mediante reactor biológico convencional o MBR

1.3 PRE-FILTRACIÓN

El uso de una etapa preliminar en un proceso de ultrafiltración es muy frecuente según el agua a tratar, para ello una etapa de pre-filtración se encarga de eliminar partículas grandes contenidas en el agua a ultrafiltrar con el fin de evitar taponamientos que alteren la presión transmembrana y generen inconvenientes en la UF; es común encontrar membranas de micro filtración las cuales tienen un costo elevado pero alargan la vida útil de la membrana UF, lo cual hace que sea una inversión inicial necesaria pero recuperable en el tiempo de ejecución de un sistema UF².

[1] ANEJO A. MEMBRANAS: membranas de ultrafiltración Comparativa de ampliación E.D.A.R. mediante reactor biológico convencional o MBR

[2] PENTAIR, Guía de aplicaciones de ultrafiltración freshpoint, filtración y proceso, 2015

1.4 COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN

Cuando se quiere realizar un tratamiento de agua residual tanto industrial como municipal, el proceso más utilizado en la actualidad es la coagulación-floculación, este se desarrolla con ayuda de productos químicos conocidos como coagulantes los cuales se encargan de atrapar todos los sólidos suspendidos en el agua para su fácil eliminación.

Como primera medida lo que se busca es preparar el fluido a tratar con el fin de que con una etapa de floculación se logre un proceso físico de separación más fácil y menos costoso.

El uso de este sistema de tratamiento convencional tiene grandes ventajas según el requerimiento de calidad, por ejemplo, es de fácil uso ya que solo se necesita vertimiento de producto químico controladamente y la separación de productos o sólidos recogidos y acumulados en la coagulación ^[1]

Este proceso a pesar de que es el más utilizado actualmente en Colombia, no ofrece grandes ventajas y beneficios comparado con sistemas de tratamiento de agua más complejos como una UF, la cual puede garantizar la completa remoción de partículas suspendidas mediante un proceso netamente físico, además ofrece garantías de eliminación de algunas moléculas como virus y microorganismos que afectan directamente la salud del consumidor, en el caso de potabilización de aguas.¹

1.5 MEMBRANA UF

Son membranas micro porosas que en este caso toman un tamaño de poro de 0,02 micras y garantizan la separación de diferentes partículas. Las membranas realizan un proceso de separación netamente físico por exclusión, donde todas las partículas que lleguen a la membrana con un tamaño superior al de su poro, se acumularan garantizando separación y obteniendo un filtrado de alta calidad ya que se pueden eliminar gran variedad de contaminantes.²

1.5.1 Liqui-Flux W05. La empresa 3M ofrece diferentes prototipos de membrana según algunas condiciones y restricciones de operación, el modelo W05 es altamente utilizado en procesos relativamente pequeños, se caracteriza por tener una carcasa de PVC teniendo en cuenta que no se requieren altas presiones, tiene gran aplicabilidad en pruebas piloto y ensayos ya que permite definir posibles condiciones de operación para procesos UF en escala industrial.³

[1] AGUILAR . SAEZ, SOLER A., ORTUÑO J.F, tratamiento físico-químico de aguas residuales

[2] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

Este modelo será el utilizado para realizar pruebas piloto en la empresa del sector alimenticio, debido a que se ajusta a condiciones de caudal y calidad de agua que serán las variables de operación a trabajar.

La empresa 3M cuenta con varios prototipos con diferentes características, pero todos guiados a solucionar problemas por medio de sistemas UF, algunos de ellos son:

- Liqui-Flux W10
- Liqui-Flux W20²

1.5.2 Funcionamiento de la membrana. Los sistemas de ultrafiltración se pueden configurar para funcionar en uno de los tres modos básicos de filtración:

Flujo cruzado: Parte del agua de alimentación fluye de manera continua hacia los desechos, con el fin de evitar que los sólidos retenidos se acumulen en la superficie de la membrana y taponen esta. Este se caracteriza por su corriente residual donde el porcentaje de rechazo juega un papel importante en el comportamiento del sistema, el cual depende del flujo de entrada y acumulación en la membrana.

Extremo muerto: no hay flujo residual desde el sistema. Cuando el filtro se conecta, se limpia o se reemplaza. En este tipo de operación el agua a tratar se caracteriza por no ser altamente contaminada, por lo que se logra mayor acumulación.

Extremo muerto con descarga periódica: no hay flujo residual continuo. La membrana se descarga periódicamente para eliminar los sólidos retenidos desde la superficie de la membrana y evitar ensuciamientos¹.

1.5.3 Dirección del flujo. Flujo de adentro para afuera: El agua que entra de alimentación circula por la parte inferior del ducto de la fibra y pasa por fuera de la estructura de fibra, por último, la corriente atraviesa el ducto y se obtiene agua ultrafiltrada.²

Flujo de afuera para adentro: El agua que entra de alimentación se encuentra afuera de la fibra, atraviesa por la parte exterior de la estructura de fibra y es allí donde se acumulada como agua tratada o filtrada.

1.6 CALIDAD DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN Y REQUISITOS DEL TRATAMIENTO PREVIO

El rendimiento de un sistema de membrana de ultrafiltración va fuertemente ligado a la calidad de agua de alimentación, al pre-tratamiento, al retro lavado, limpieza y frecuencia.

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016 x|

1.7 CONDICIONES GENERALES DE ALIMENTACIÓN

- Temperatura: 34° a 104 °F.
- pH: 3 a 10.
- Hierro: el hierro disuelto no ensucia la membrana ni la membrana elimina el hierro disuelto. Las concentraciones bajas de hierro precipitado se pueden eliminar, pero pueden causar ensuciamiento de membrana en concentraciones superiores a 1 mg/l.
- Cloro: 4,0 mg/l continuo (200,0 mg/l a corto plazo).
- Ozono: 0,0 mg/l.
- Turbiedad: 5,0 NTU continuo (20,0 NTU intermitente).
- Silicona/lubricantes de silicona: no deben entrar en contacto con la membrana en concentraciones que causan ensuciamiento.
- Solventes orgánicos/solventes clorinados: no deben entrar en contacto con la membrana.
- Polielectrolitos: no deben entrar en contacto con la membrana en concentraciones que causan ensuciamiento de membrana.

1.8 CALIDAD TÍPICA DEL AGUA FILTRADA

La calidad de la filtración dependerá de varios factores y del cumplimiento del manual del sistema de ultrafiltración.

- Eliminación de partículas: 99% + eficacia de eliminación para partículas de 1 micrón y superiores
- Turbiedad: < 5 NTU
- Reducción de quistes: 99,95%
- Reducción de bacterias: reducción del registro de 4 a 6 (como se prueba con Klebsiella terrigena)
- Reducción de virus: reducción del registro de 1 a 4 (como se prueba con coliphage MS2)
- SDI15: < 2²

1.9 PRESIÓN TRANSMEMBRANA

En el interior de la membrana donde se encuentra la estructura fibrilar, se maneja cierta presión que debe cuidarse para evitar superar el límite de la membrana y provocar fracturamiento estructural.¹

[1] DP WATERING, tratamiento de agua por ultrafiltración 2018

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

En la operación de un sistema UF siempre se va a generar cierta acumulación en la membrana, razón por la cual se debe tener perfectamente estudiada el agua a tratar, ya que si se tiene agua con alta carga de sólidos y grasas la acumulación será mayor y por lo tanto la presión transmembrana aumenta; esta variable de proceso se debe cuidar para cumplir con el requerimiento mínimo de vida útil de la membrana, de lo contrario el proceso no será rentable ya que se debe cambiar la membrana UF en periodos demasiado cortos sin permitir la recuperación de la inversión en el proceso.¹

1.10 MANTENIMIENTO DE LA MEMBRANA

En todo proceso de ultrafiltración por membrana es importante tener en cuenta que la inversión inicial es elevada comparado con un proceso convencional, la utilidad que tiene una etapa UF se aprovecha al máximo al realizar un mantenimiento adecuado de la membrana, aumentando así considerablemente su vida útil y haciendo el proceso rentable.

Para realizar un correcto mantenimiento se debe tener en cuenta la caracterización físico-química que se desarrolla previo al montaje de la membrana, teniendo en cuenta que dependiendo del contaminante que se acumule en la membrana se debe cambiar la frecuencia del mantenimiento. El desarrollo de un CIP (cleaning in place) en el caso de UF se realiza por medio de un retro lavado con agua ultrafiltrada según recomendación del proveedor (3M), para ello se requiere una bomba adicional a la de alimentación que garantice que la presión sea la suficiente para la remoción de contaminantes acumulados en la estructura de la membrana; es común encontrar este tipo de mantenimiento en modo de operación dead-end el cual no maneja aguas agresivas (contaminantes peligrosos)².

En caso que el proceso sea para el tratamiento de aguas con presencia de contaminantes peligrosos es común encontrar un CEB (chemical enhanced backwash), el cual basa su accionar en la utilización de productos químicos en el mantenimiento de la membrana, la presión transmembrana es un indicador que permite concluir que tanta acumulación se está dando en el interior de la membrana; productos como la soda caustica tienen alta aplicabilidad para la descontaminación del sistema, pero se debe seleccionar el producto químico dependiendo del tipo de contaminantes presentes en el agua.¹

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

Un sistema CEB tiene características principales como:

- Se requiere producto químico
- Bomba de retrolavado con químicos
- Se genera una corriente de desperdicio ¹

1.11 ÁREAS DE APLICACIÓN UF

Actualmente el mundo tiene grandes y diferentes problemas de contaminación que amenazan a su recurso hídrico más importante, el agua cada día escasea con respecto a la creciente población, por lo tanto, es importante encontrar diferentes alternativas que permitan a la humanidad maximizar el aprovechamiento de agua y a su vez que satisfagan su creciente consumo en el mundo.^{1,2}

Grandes ciudades en el mundo se ven enfrentadas a problemas de sanidad dependientes del tipo de agua con que alimentan sus residentes, un sistema UF ataca de manera directa en el sector de potabilización, garantizando agua de alta calidad libre de patógenos y turbidez; esta es una aplicación fundamental en el mundo actual, sin embargo, también tiene gran importancia en aspectos relacionados con procesos de filtración como:

1.11.1 Pre-tratamiento para sistemas de OI y NF. Actualmente diferentes procesos industriales requieren la presencia de OI y NF ya que garantizan separaciones físicas que ningún otro método puede ofrecer, de allí que el gasto energético generalmente térmico, disminuye al utilizar este tipo de tecnología, sin embargo en dichos procesos se utilizan membranas con un tamaño de poro tan disminuido que acumulan fácilmente muchas partículas en su estructura, de allí nace la necesidad de utilizar obligatoriamente pre-tratamientos que garanticen un alargamiento de vida útil para las membranas de NF y OI; la UF es tenida en cuenta para este proceso de pre-tratamiento, ya que brinda y garantiza remoción de partículas que fácilmente se acumulan en un proceso de OI, además que garantizan un gasto de presión mínimo, teniendo en cuenta que este aumenta considerablemente al tener acumulación.

El factor más importante para que una UF sea tenida en cuenta a la entrada de procesos como OI y NF es el aspecto económico, ya que allí se manejan tamaños de poro pequeños lo que genera un elevado costo en sus membranas, al utilizar un tratamiento preliminar con una membrana UF se garantiza el correcto accionar.^{1,2}

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

1.11.2 Agua potable. Existen diferentes procesos convencionales que llevan a la potabilización de agua, sin embargo, al terminar con dichos procesos en ocasiones se encuentran diferentes problemas respecto a la presencia de algunos agentes patógenos, que no logran ser removidos con la concentración permitida de productos como el cloro. Un sistema UF utilizado para la obtención de agua potable tiene grandes ventajas comparado con un proceso convencional como el de floculación con filtros multicapa, una de las más importantes y que reduce el costo de forma considerable en un proceso, es la automatización que se maneja en un sistema UF, que además de disminuir costos operacionales, también disminuye el riesgo de problemas habituales en un sistema convencional, como el uso inadecuado de productos químicos.¹

1.11.3 Reutilización de agua residual industrial. La mayoría de los procesos necesitan agua para su ejecución, es muy común encontrar como las diferentes industrias envían a vertimiento su corriente residual, un proceso de UF que depende del agua a tratar y el agua que se quiere obtener, ayuda considerablemente a la industria ya que crea la posibilidad de reutilizar agua y crear procesos auto sostenibles; sectores como el alimenticio pueden encontrar allí la oportunidad de aumentar ganancias teniendo en cuenta que el costo del recurso natural es cada día más alto, debido a su escases y el elevado crecimiento poblacional en el mundo.^{1,2}

1.11.4 Agua de proceso. La industria en el mundo se caracteriza porque todas las materias primas utilizadas están guiadas hacia un recurso natural, lo que genera escases en la mayoría de ellos; el agua es una corriente de proceso que cada vez cobra más importancia, debido a que en la mayoría de procesos su no reutilización no está permitida. Un proceso de UF puede garantizar agua de tan alta calidad que en industria como la de alimentos se puede llegar a obtener una corriente de reúso en sus diferentes procesos, además la filtración por membrana garantiza una calidad constante, disminuye costos de operación, tiene bajo costo de mantenimiento y es una inversión rápidamente recuperable.²

- **Aguas residuales**

Las aguas residuales pueden tener diferentes sitios de procedencia, de allí se puede definir el tratamiento que estas deben tener; agua domestica e industrial son los principales generadores por lo cual hacia los que se basan las diferentes metodologías de tratamiento.

Actualmente en Colombia y el mundo se busca mitigar consecuencias por la alta generación de agua residual industrial, bien sea por la presencia de agresivos contaminantes en el vertimiento, cada uno tiene diferentes estrategias para su manejo. En cuanto al agua que se genera en la industria hay grandes posibilidades de convertirla en un subproducto y reutilizarla en otro proceso con un tratamiento leve, pero actualmente el impacto ambiental ha generado que se busquen alternativas que permitan tener agua residual de alta calidad, tanto que se han generado alternativas para potabilización como la ultrafiltración.

1.11.5 marco legal. La normatividad que acoge el tratamiento de agua residual por lo menos para vertimiento, garantiza que no llega a afectar diferentes ecosistemas con la presencia de compuestos, pero en baja proporción y con agresividad mínima, por eso en las diferentes industrias se ha vuelto frecuente el uso de tratamiento de agua antes del vertimiento, garantizando así el cumplimiento de la resolución 2115 de 2010 del Ministerio de Medio Ambiente, en la cual se tratan diferentes aspectos en cuanto a la calidad de agua que hará contacto con efluentes.

Resolución 0631 de 2015

Esta resolución abarca la normatividad relacionada con límites máximos que se permiten en vertimientos puntuales a aguas superficiales teniendo en cuenta el grado de contaminación que este pueda tener, también tiene normatividad del alcantarillado público con el fin de cuidar la calidad de los diferentes efluentes.

Resolución 1207 de 2014

Esta resolución abarca la normatividad que se debe tener en cuenta para el reúso de aguas, contemplando aspectos como: la procedencia del agua y la calidad de esta. Es importante resaltar que divide la especificación de reúso entre uso industrial y uso agrícola.¹

Resolución 2659 de 2015

En esta resolución se establece los requerimientos necesarios para la solicitud de permiso de vertimiento no domestico al alcantarillado público, con el fin de impedir el vertimiento de aguas altamente contaminadas.

¹] Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible RESOLUCIÓN NÚMERO 1207 DE 2014 Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/Res_1207_2014.pdf MINISTERIO DE LA PROTECCION SOCIAL[2]DECRETO NÚMERO 1575 DE 2007 Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Disponibilidad-del-recurso-hidrico/Decreto-1575-de-2007.pdf>.

2. DIAGNOSTICO

En este capítulo se realiza un diagnóstico del proceso de la industria alimenticia para conocer las corrientes, calidad del agua y caudales que llegan a la planta de tratamiento con la que cuenta actualmente. De igual manera se informa de normas por las cuales se rige esta empresa y que características debe tener el agua a la salida tanto para vertimiento como para su reutilización.

Se explican las políticas por las cuales se rigen las empresas alimenticias en el país, cómo este sector ayuda al crecimiento económico del país, la labor social y las personas que componen el sector alimenticio y de lácteos, los avances tecnológicos en Colombia para la optimización de procesos, las normas ambientales que se deben cumplir y requerimientos legales.

Por último, se realiza un análisis para determinar si el proceso requiere un pre tratamiento y cuáles son las ventajas y puntos a favor sobre el proceso actual.

2.1 ANÁLISIS PESTAL

Se realiza un análisis PESTAL, el cual permite identificar diferentes características del proceso en distintos ámbitos como lo son, el político, económico, social, tecnológico, ambiental y legal.

2.1.1 Político. El estado colombiano en el último año ha tenido acercamientos con Nueva Zelanda para la firma del tratado de libre comercio con este, sabiendo que es el mayor productor de leche mundial en donde en años como 2016/2017 reportó una producción de 20.700 millones de litros de leche, es decir casi 7 veces más que en Colombia la cual para ese mismo año alcanzó fue 3.220 millones de litros.¹

La firma del tratado de libre comercio y la entrada de Nueva Zelanda al mercado lácteo marcaría el final para el sector lechero del país con la imposibilidad de competir con nueva Zelanda en producción y bajos costos, los cuales además permiten a nueva Zelanda posicionarse en cualquier mercado del mundo.¹

[1]PORTAL LECHERO. Oceanía inquieta al campo Colombiano empleo [En línea] Disponible en: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/52/1/innova.front/noticias-de-colombia.html> (consultado el 07 de agosto de 2018)

Asoleche y demás gremios lácteos del país argumentan que la entrada de Nueva Zelanda con la cadena láctea implicaría la destrucción de un sector que aporta el 24,5 % del PIB y que genera 700 mil empleados en cerca de 400mil predios a lo largo del país.

Actualmente uno de los retos más importantes se relaciona con desarrollar e implementar un esquema capaz de enfrentar los desafíos para la internacionalización de la economía y las exigencias del mercado y el posicionamiento en otros países. Durante los últimos años la informalidad ha sido uno de los aspectos que más han afectado el crecimiento del sector lácteo en Colombia, uno de los retos de Asoleche es acabar con esto con sanciones drásticas y regulaciones.

El país sigue en deuda frente al tratamiento de aguas residuales que generan cerca el 70 por ciento de los municipios, una problemática ambiental que para algunos sectores aún está lejos de superarse. La brecha entre los países europeos y los latinoamericanos es gigantesca frente al tratamiento de aguas y la contaminación de esta en donde estudios muestran que cerca del 80% de aguas residuales no son tratadas adecuadamente y contaminan los ríos y mares.¹

Aun son muy pocas la empresa que cumplen las normas de vertimientos y de abastecimientos de aguas superficiales en Colombia y solo el 31% de las ciudades cuentan con sistemas de tratamiento de estas corrientes.

2.1.2 Económico. En el primer trimestre de 2018, el Producto Interno Bruto en su serie original presentó un crecimiento de 2,2% respecto al mismo periodo de 2017, Este comportamiento se explica principalmente por el crecimiento de administración pública y defensa que registró una variación de 5,9%; y comercio al por mayor y al por menor que creció 3,9%. En contraste, la actividad que presentó la principal caída fue construcción en 8,2%.²

[1] OCEANÍA INQUIETA AL CAMPO COLOMBIANO, Ferney Arias Jiménez. [En línea] Disponible en: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/13210/1/innova.front/colombia:-leche-carne-y-azucar-de-oceania-inquieta-al-campo-colombiano.html> (consultado el 30 de Agosto de 2018).

[2] PRECIO NACIONAL LECHE, Asoleche. [En línea] Disponible en: <https://asoleche.org/leche-en-cifras/> (consultado el 24 octubre de 2018)

Tabla 1. Comportamiento del PIB por Ramas de Actividad Económica 2018

Ramas de actividad	Variación porcentual (%)	
	Anual	Trimestral
Agricultura, ganadería, caza, silvicultura y pesca	2,0	-1,3
Explotación de minas y canteras	-3,6	-2,6
Industrias manufactureras	-1,2	1,2
Suministro de electricidad, gas vapor y agua	0,6	-0,9
Construcción	-8,2	-2,4
Comercio al por mayor y al por menor	3,9	1,6
Información y comunicaciones	3,1	4,0
Actividades financieras y de seguros	6,1	0,4
Actividades inmobiliarias	2,9	0,8
Actividades profesionales, científicas y técnicas	5,6	5,7
Administración pública y defensa	5,9	1,4
Actividades artísticas, de entretenimiento y recreación y otras actividades	4,0	2,9
Total valor agregado	2,1	0,7
Total Impuestos - subvenciones	3,3	1,8
Producto Interno Bruto	2,2	0,7

Fuente: DANE. Pib Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/cuentas-nacionales-departamentales-pib-trimestral-bogota-d-c> (Consulta el 29 de julio de 2018)

Con respecto a Agricultura, caza, silvicultura y pesca se presentó un crecimiento de 2 puntos porcentuales frente a su serie original del año 2017.

Tabla 2. Variación porcentual por ramas de actividad.

Ramas de actividad	Variación porcentual (%)	
	Anual	Trimestral
Elaboración de productos alimenticios	2,1	2,6
Fabricación de productos textiles	-4,6	2,5
Transformación de la madera y fabricación de productos de madera y de corcho, excepto muebles	-1,7	3,4
Coquización, fabricación de productos de la refinación del petróleo y actividad de mezcla de combustibles	-2,4	0,1
Fabricación de productos metalúrgicos básicos	-4,2	1,4
Fabricación de muebles, colchones y somieres; otras industrias manufactureras	0,8	1,3

Fuente: DANE. Pib Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/cuentas-nacionales-departamentales-pib-trimestral-bogota-d-c> (Consulta el 29 de julio de 2018)

La elaboración de productos alimenticios presento un aumento porcentual de 2.1% frente a su serie original del año anterior.

Gráfico 1. Aumento por región



Fuente: DANE. Pib Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/cuentas-nacionales-departamentales-pib-trimestral-bogota-d-c> (Consulta el 29 de julio de 2018)

Se muestra un aumento del precio de la leche que se paga al productor del 2008 al 2018, en donde se presenta un aumento en la región 1, región 2 y a nivel nacional situándose en valores de \$996 a \$1.075.

2.1.3 Social. El país demuestra un incremento de la población donde se ven afectados diferentes factores, principalmente sociales y económicos que logran aumentar como lo son: el proceso de paz y el otro factor es la gran afluencia de venezolanos que han llegado al país. Se tiene proyectado para el año 2020 la población habrá alcanzado un total del 50.912.429.¹

[1] OCEANÍA INQUIETA AL CAMPO COLOMBIANO, Ferney Arias Jiménez. [En línea] Disponible en: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/13210/1/innova.front/colombia:-leche-carne-y-azucar-de-oceania-inquieta-al-campo-colombiano.html> (consultado el 30 de Agosto de 2018).

Fuente: DANE. Pib Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/cuentas-nacionales-departamentales-pib-trimestral-bogota-d-c> (Consulta el 29 de julio de 2018)

Tabla 3. Población colombiana

Departamentos	Años			
	2005	2010	2015	2020
Nacional	42.888.592	45.508.205	48.202.617	50.912.429
Antioquia	5.682.276	6.065.846	6.456.207	6.845.057
Atlántico	2.166.156	2.314.447	2.461.001	2.601.116
Bogotá D.C.	6.840.116	7.363.782	7.878.783	8.380.801
Bolívar	1.878.993	1.979.781	2.097.086	2.219.461
Boyacá	1.255.311	1.267.597	1.276.367	1.286.996
Caldas	968.740	978.362	988.003	997.890
Caquetá	420.337	447.723	477.619	508.534
Cauca	1.268.937	1.318.983	1.379.070	1.437.141
Cesar	903.279	966.420	1.028.880	1.089.783
Córdoba	1.467.929	1.582.718	1.709.603	1.838.574
Cundinamarca	2.280.037	2.477.036	2.680.041	2.887.005
Chocó	454.030	476.173	500.076	525.528
Huila	1.011.418	1.083.200	1.154.804	1.225.260
La Guajira	681.575	818.695	957.814	1.093.733
Magdalena	1.149.917	1.201.386	1.259.667	1.326.341
Meta	783.168	870.876	961.292	1.053.871
Nariño	1.541.956	1.639.569	1.744.275	1.851.658
Norte de Santander	1.243.975	1.297.842	1.355.723	1.414.032
Quindío	534.552	549.624	565.266	581.534
Risaralda	897.509	925.105	951.945	978.182
Santander	1.957.789	2.010.404	2.061.095	2.110.608
Sucre	772.010	810.650	851.526	894.734
Tolima	1.365.342	1.387.641	1.408.274	1.427.423
Valle del Cauca	4.161.425	4.382.939	4.613.377	4.852.896
Arauca	232.118	247.541	262.315	275.814
Casanare	295.353	325.596	356.438	387.822
Putumayo	310.132	326.093	345.204	369.332
San Andrés y providencia	70.554	73.320	76.442	79.693
Grupo Amazonía	293.658	318.856	344.424	371.610

Fuente: DANE. Pib Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/cuentas-nacionales-departamentales-pib-trimestral-bogota-d-c> (Consulta el 29 de julio de 2018)

El gobierno nacional se preocupa por el desarrollo humano integral con el objetivo de lograr una sociedad incluyente y con igualdad de oportunidades para todos. Lo cual se ha buscado lograr mediante la garantía de los derechos mínimos vitales, a través de programas que están destinados a la población en condición de pobreza y máxima pobreza.

La falta de agua potable en algunas regiones de Colombia es una problemática que abarca a las personas más pobres donde aún no llegan estas tecnologías. La contaminación y la falta de conciencia provocan que día a día se pierdan m redes hídricas y que el agua sea más escaza y costosa.

La tasa de mortalidad infantil por enfermedades relacionadas con el consumo de agua de baja calidad, entre las que se encuentran la diarrea y el cólera, aún es alta en el país. Las malas aguas generan un impacto negativo en la salud pública que según cálculos recientes asciende aproximadamente a 1,96 billones de pesos al año²¹, de los cuales el 70% corresponde al impacto de la morbilidad y mortalidad por enfermedades diarreicas y el 30% restante al gasto en prevención

2.1.4 Tecnológico. El aporte de la ciencia y tecnología influye el crecimiento económico de un país. En los últimos años Colombia ha incentivado la innovación y ha realizado aportes al desarrollo en donde la ciencia y la tecnología han tenido más fuerza, entendiendo que la ciencia y la tecnología impulsa la frontera de conocimiento y es una fuente de transformación social, económica, y ambiental.

Es pertinente señalar que el factor tecnológico se encuentra en constante crecimiento y busca a través del emprendimiento conocimientos en diferentes actividades en busca del desarrollo del país en sus diferentes sectores económicos.

En el contexto en la industria de alimentos se ha presentado un gran crecimiento frente a las tecnologías utilizadas tanto para tratar los alimentos como para el tratamiento de aguas residuales. En las últimas décadas se han presentado importantes avances a las ciencia y tecnología de los alimentos basados en la conservación y procesamiento de alimentos sin alterar propiedades nutricionales y mejorando el desempeño ambiental.¹

Actualmente los consumidores se encuentran mejor informados por lo que la industria de alimentos ha requerido una innovación y mejora constantes para ir al paso de las exigencias del consumidor con productos menos procesados y más naturales, más inocuos, de mayor calidad y una vida útil más larga.

[1] OCEANÍA INQUIETA AL CAMPO COLOMBIANO, Ferney Arias Jiménez. [En línea] Disponible en: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/13210/1/innova.front/colombia:-leche-carne-y-azucar-de-oceania-inquieta-al-campo-colombiano.html> (consultado el 30 de Agosto de 2018).

Las industrias de alimentos han avanzado junto con la tecnología para realizar un cambio frente métodos convencionales que requieren un mayor costo y ocupan un volumen mayor a las nuevas tecnologías que logran en espacios reducidos con uso de químicos menores mayores eficiencias agua de mejores características.

2.1.5 Ambiental. En los últimos años Colombia ha implementado políticas ambientales que busca el desarrollo sostenible del país en donde se quiere un equilibrio en los social, ecológico y económico. Se han implementado gestiones ambientales en un proceso orientado a resolver, mitigar y prevenir los problemas de carácter ambiental.

La gestión ambiental principalmente aplicada en 4 aspectos relevantes como lo son

Diagnósticos ambientales de las organizaciones (identificando aspectos e impactos ambientales), 2. Plan de manejo ambiental, 3. Seguimiento al plan de manejo ambiental y 4. Una mejora continua de la gestión ambiental.

Una de las estrategias que ha tomado fuerza es la producción más limpia en donde se minimizan la generación y descarga de productos, reduciendo los riesgos para la salud humana y elevando la competitividad de las organizaciones aplicada en los procesos industriales de las empresas.

Colombia es un país con un alto recurso hídrico, en donde ocupa el séptimo puesto en el ranking de los países con mayor disponibilidad de recursos hídricos renovables tras Brasil, Rusia, USA, Canadá, Indonesia y China.

En cuanto a la demanda de agua y la distribución geográfica no hay una organización y disponibilidad adecuada. En la parte norte del país existe la mayor demanda del país y no se cuenta la mayor disponibilidad de agua para cubrir toda la población, y en las zonas de Amazonia y Orinoquia, donde se concentra la mayor disponibilidad de agua del país, cuenta con la menor cantidad de población nacional.

En la última década el concepto de huella hídrica se ha implementado en casi en todo el mundo, la cual se define como el volumen de agua utilizado por un individuo o corporación. La huella hídrica está compuesta por 3 componentes:

Huella hídrica Verde: Es el volumen de agua lluvia que no se convierte en escorrentía, por lo que se almacena y así se satisface la demanda de la vegetación para posteriormente volver a la atmósfera por procesos de Evapotranspiración.

Huella hídrica Azul: Es el volumen de agua dulce extraído de una fuente superficial o subterránea y que posteriormente se usa para la producción de bienes y servicios.

Huella hídrica Gris: Es el volumen de agua necesaria para que un cuerpo receptor de agua se contamine por aguas residuales vertidas por cadenas de producción superando los límites permitidos por la legislación vigente en Colombia.

2.1.6 Legal. Las industrias de alimentos deben cumplir normatividades frente al uso del agua para sus procesos y el vertimiento de sus aguas residuales.

Según el MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL la resolución número 2115 señala las características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, por lo que las industrias que usan aguas en sus procesos que estén directamente relacionados con el producto que será dirigido al cliente debe cumplir y estar bajo esta resolución siendo monitoreado constantemente para evitar sanciones y la afectación de los ciudadanos.

La norma de vertimientos, la Resolución 0631 de 2015 reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010. Esta permite el control de las sustancias contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas, en donde esta resolución es obligatorio cumplimiento para las empresas de alimentos en donde certifica que las aguas residuales procedentes de sus procesos tendrán unas características requeridas para poder ser desechada.

2.2 PLANTA

El proyecto se desarrolla en una de las compañías más grandes e importantes del país del sector lácteo, la cual cuenta actualmente con 6 plantas de producción en Colombia y con representación de 7 productos de su portafolio en 11 países de América. A nivel nacional la planta más grande se encuentra ubicada en Sopó, Cundinamarca, donde se llevará a cabo el análisis de la viabilidad técnica y financiera de un proceso de ultrafiltración en el sector alimenticio.

La producción de alimentos en esta planta está dividida en seis categorías: bebidas lácteas, quesos, leches, postres, bebidas refrescantes y alimentos para bebés, los cuales se encuentran sectorizados en pasteurización, ultra pasteurización, pulverización, quesos, jugos, yogures, almacenamiento y logística, dicha división permite a la empresa tener un control de calidad más detallado en cada una de sus diferentes áreas de producción.

La pasteurización y ultra pasteurización son procedimientos similares, los cuales diferencian su accionar en la temperatura con la que es tratado el alimento, en este caso productos lácteos; en la planta de Sopó manejan la ultra pasteurización directamente con la línea de productos para bebé, los cuales según normatividad colombiana tienen mayor exigencia de calidad.

En el área de quesos (quesería) se maneja tecnología similar a la que se quiere implementar con el piloto, se utilizan procesos de nano y ultrafiltración, allí su

materia prima (suero) es enviada a diferentes membranas con el fin de obtener el permeado, teniendo en cuenta que es allí donde se encuentran las proteínas y demás propiedades importantes del suero, y útiles para fabricar un queso con altos estándares de calidad nutricional.

El sector de jugos en la planta es un sector con continuos avances tecnológicos, uno de los mayores retos que manejan allí es la conservación del producto evitando el uso excesivo de conservantes y productos de origen orgánicos. El área de extracción cuenta con un proceso de alta efectividad, pero con un gasto energético alto.

Fue posible identificar la tecnología con la que cuenta esta empresa, llamando la atención especialmente tecnologías de pulverización que permiten el alargamiento de vida útil en diferentes productos o materias primas utilizadas por la compañía. Actualmente, la empresa implementa tecnologías de ultra y nanofiltración (Figura 1.) en la etapa de producción de queso (Figura 2), la cual tiene como objetivo recuperar componentes importantes del suero, conservando el residuo de membrana y desechando el permeado de ultrafiltración

Figura 1 Quesería



Fuente: Elaboración propia

Figura 2 Planta



Fuente: Elaboración propia

En las líneas de producción de la planta de Sopó se generan grandes cantidades de agua, la cual es llevada a una Planta de Tratamiento de Agua Residual (PTAR) que opera 6 días a la semana garantizando el cumplimiento de normatividad para vertimiento en el país (resolución 2115 de 2010, Ministerio de Medio Ambiente).

De la salida de agua de la PTAR se tomaron muestras para posteriormente realizar el análisis fisicoquímico necesario para demostrar la viabilidad técnica de un proceso de ultra filtración en dicha etapa. El muestreo se realizó de forma simple ya que las muestras son tomadas en un tiempo y lugar determinado para su análisis individual. El agua que va a vertimiento es decir a la salida de la PTAR es la fuente de agua a tratar. Para la realización del mismo se utiliza: bata blanca, pantalón blanco, botas de seguridad y cofia.

Figura 3. Agua residual



Fuente: Elaboración propia

La Figura 3., muestra el canal por el que circula agua que será procesada en la PTAR y va directamente a vertimiento; de allí se toma una muestra de 300 cm³ (Figura 3.) con la cual se determinan diferentes propiedades importantes para la caracterización de esta corriente de agua.

Figura 4. Muestra 1



Fuente: Elaboración propia

2.3 CAUDAL

Según datos históricos suministrados por la empresa se tienen un valor promedio de caudal de salida de la PTAR de 65.955 m³/mes y 120 m³/hora, siendo equivalente al 95% del agua tratada, este valor varía dependiendo de tiempos y tipo de producción en la planta, teniendo en cuenta que es allí donde se unen las corrientes de agua residual de todas las etapas generadoras. La tabla 4 presenta diferentes valores de caudal de agua tratada por la PTAR en diferentes periodos de tiempo la cual permite obtener un valor promedio de agua tratada y llevada a vertimiento.

Tabla 4. Caudal PTAR

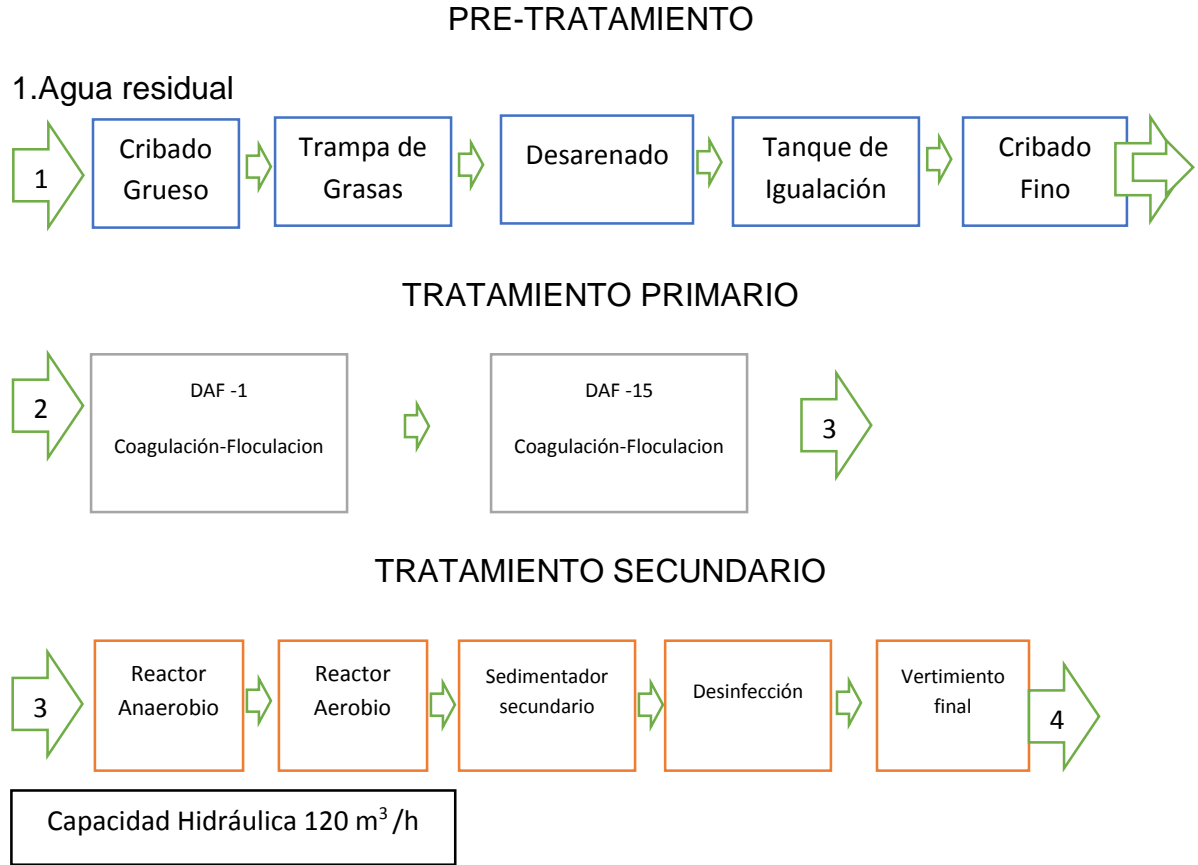
MES	Caudal (m³/mes)
jul-17	65.994
ago-17	66.921
sep-17	65.098
oct-17	66.220
nov-17	70.508
dic-17	70.522
ene-18	67.120
feb-18	58.161
mar-18	68.751
abr-18	59.720
may-18	71.347
jun-18	60.411
jul-18	67.163

Fuente: Elaboración propia

2.4 FUNCIONAMIENTO PTAR

La PTAR que se encuentra en Sopó y que es la fuente generadora de agua para el proceso de ultrafiltración a desarrollar, tiene un funcionamiento adecuado con el que cumplen permanentemente la normatividad de vertimiento, el Diagrama 2., muestra las diferentes etapas que se llevan a cabo en el tratamiento que la compañía desarrolla actualmente con su agua residual, básicamente son tres etapas principales: Pre-tratamiento, tratamiento primario y secundario donde cabe resaltar etapas principales como desarenado, coagulación-floculación y desinfección .

Diagrama 2. Funcionamiento PTAR



Fuente: Planta de estudio Sopó

2.5 AGUA ESPERADA POR LA EMPRESA

La compañía evaluada tiene algunos parámetros definidos internamente en cuanto al agua que esperan obtener por medio de sus PTAR. Dependiendo la aplicación que se quiera dar a un posible reúso los estándares pueden variar debido a que las líneas de producción son diferentes y por lo tanto requieren agua con diferentes propiedades, para ello manejan ciertos parámetros de caracterización los cuales cumplen la normatividad de vertimiento, la Tabla 5., muestra a nivel general el agua que la compañía espera según requerimientos mínimos en diferentes propiedades (resolución 2115) como pH, cloruros, fosfatos, turbiedad, etc.

Tabla 5. Agua esperada

Parámetro	Unidades	Resultado
Color Verdadero	UPC	<15
Turbiedad	NTU	<2
Conductividad	μS/cm	<1000
pH.	Unidades de pH	6,5 - 9,0
Cloro Residual	mg/L	0,3 - 1,0
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	200
Aluminio	mg/L	0,2
Calcio	mg/L	60
Cloruros	mg/L	250
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	100
Fosfatos	mg/L	5
Hierro	mg/L	0,3
Magnesio	mg/L	36
Manganeso	mg/L	0,1
Molibdeno	mg/L	0,07
Sulfatos	mg/L	250
Zinc	mg/L	3,0
Carbono Orgánico Total	mg/L	5,0
Nitratos	mg/L	10
Nitritos	Mg L	0,1
Fluoruros	mg/L	1
Antimonio	mg/L	0,02
Arsénico	mg/L	0,01
Bario	mg/L	0,7
Cadmio	mg/L	0,003

Fuente: Planta Sopó

Tabla 6. Continuación tabla 5

Cianuro Libre y Disociable	mg/L	0,05
Cobre	mg/L	1
Cromo Total	mg/L	0,05
Mercurio	mg/L	0,001
Níquel	mg/L	0,02
Plomo	mg/L	0,01
Selenio	mg/L	0,01
Triahlometanos Totales	mg/L	0,2
Hidrocarburos aromáticos poli cíclicos	mg/L	0,01
Coliformes Totales	UFC/100 ml	0
Escherichia Coli	UFC/100 ml	0
Microorganismos Mesófilos	UFC/100 ml	100
Giardia	Quistes	0
Cryptosporidium	Ooquistes	0
Olor	N/A	Aceptable
Sabor	N/A	Aceptable

Fuente: Planta Sopó

El equipo adecuado para usar posteriormente al proceso de la PTAR es una ultrafiltración ya que este permite obtener agua con la calidad esperada y lograr una reducción en la cantidad de agua utilizada y una disminución económica que conlleve a la empresa una mejora en todo su proceso.

Se decide usar ultrafiltración ya que comparado con los demás procesos que también logren obtener un agua con la calidad necesaria para ser reutilizada al proceso es el más económico y desde el punto operativo es el que más se acomoda teniendo en cuenta las operaciones que se usan en el método convencional.

Teniendo en cuenta las condiciones que la empresa exige, la visita que se realiza en la planta tiene como principal objetivo diagnosticar y muestrear para una posterior caracterización del agua, la muestra fue tomada directamente de la planta y fue caracterizada con ciertos parámetros que indicaran si se requiere o no pretratamiento en el proceso UF a utilizar a la salida de la PTAR. El análisis físico-químico se desarrolló en los laboratorios que la compañía dp watering contrata generalmente al empezar con nuevos proyectos, debido a su amplia experiencia en el sector de tratamiento de aguas. La Tabla 6., representa de forma resumida y

complementada los análisis desarrollados dentro de la planta y en los laboratorios de dp watering, la información allí consignada toma gran importancia para el correcto montaje del piloto en la corriente de salida de la PTAR, ya que esto puede significar problemas posteriores con la membrana, por ejemplo, acumulación, lo cual disminuye la capacidad de filtración y a su vez disminuye la viabilidad técnica y financiera del proceso.¹

Tabla 7. Caracterización

	Unidades	Resultados II Semestre 2018
pH	Unidades de pH	7,82 - 8,12
Temperatura	°C	21,4 - 26,6
DQO	mg/L	96
DBO5	mg/L	38
G&A	mg/L	<5
SST	mg/L	37
Ssed	ml-L/h	<0,5
Fosforo	mg/L	33,8
Ortofosfatos	mg/L	2,4
Nitratos	mg/L	19,7
Nitritos	mg/L	1498
Nitrógeno Amoniacal	mg/L	9,9
Nitrogeno Total	mg/L	13,4
Kjedhal		
Cloruros	mg/L	284
Sulfatos	mg/L	13
Dureza Cálcica	mg/L	80
Dureza Total	mg/L	150
Acidez	mg/L	<10
Alcalinidad	mg/L	753
Color		
	436	nm (m-1)
	525	nm (m-1)
	620	nm (m-1)

Fuente: Planta de estudio Sopó

[1]EFECTO DE LA LIMPIEZA QUÍMICA EN LA PERMEABILIDAD DE MEMBRANAS CERÁMICAS DE ULTRAFILTRACIÓN, José Edgar zapata Montoya. [En línea] Disponible en: <https://hera.ugr.es/tesisugr/16427300.pdf> (consultado el 21 de septiembre de 2018)

2.6 LIMITES OPERATIVOS DEL SISTEMA UF

Para obtener un funcionamiento adecuado del sistema UF, es importante ingresar el agua de alimentación en unos límites establecidos, los cuales permitan la mayor remoción de contaminantes y una mayor vida útil de la membrana, en la tabla 7. se especifica las condiciones que se deben tener en cuenta en la UF.

Tabla 8. Límites de operación

Límites Operativos del Sistema de UF de Membrana	Valor
pH	2-12
Temperatura operativa (°C)	Menor a 40
Presión transmembrana. (Bar)	Menor a 2,5
Presión de trabajo Max. (Bar)	6,0 a 20
Tolerancia al Cloro instantáneo Max. (ppm)	200
Tolerancia al cloro libre Max. (ppm /h)	200000

Fuente: MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

Para garantizar el rendimiento óptimo de la membrana se requiere que el agua de alimentación este dentro de los límites de operación de la membrana, para ello se comparara los análisis obtenidos por la empresa y dp Watering y se verificara si se encuentran en los rangos de operación óptima de la membrana. De no ser así se deberá realizar un pre tratamiento el cual cumpla los requerimientos para el ingreso al sistema UF.

2.7 CONDICIONES DE ENTRADA A LA MEMBRANA

Los datos proporcionados en la Tabla 6., hacen referencia a la caracterización del agua a tratar por medio de análisis fisicoquímico, es importante resaltar que no todo proceso de UF requiere un tratamiento previo para garantizar excelentes resultados, de allí nace la necesidad de hacer una comparación directa entre los datos obtenidos del agua a la salida de la PTAR (ver tabla 6) y los requerimientos de entrada en una membrana de ultrafiltración (ver tabla 7), esto permite identificar qué propiedades generan inconvenientes en el proceso y así mismo direcciona el pre tratamiento y garantiza un mejor rendimiento. Una de las principales causas de un pretratamiento es el tamaño de poro que tiene una membrana de UF (0,02 micras); lo que puede ocasionar acumulación y la tasa de permeado disminuye considerablemente, haciendo menos eficiente el proceso de ultrafiltración.

Tabla 9. Límites de operación

parametro	requerido	analizado	cumplimiento
pH	2- 12(contínuo)	7,82 - 8,12	CUMPLE
Temperatura Operativa (°C)	Menor a 40	25	CUMPLE
Presión Transmembrana. (Bar)	Menor a 2,5	PROCESO	CUMPLE
Presión de trabajo Max. (Bar)	6,0 a 20 °C	PROCESO	CUMPLE
Tolerancia al Cloro instantáneo Max. (ppm)	200	0	CUMPLE
Tolerancia al cloro libre Max. (ppm h)	200000	284	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia.

Según la Tabla 9., el proceso de ultrafiltración a desarrollar no requiere un tratamiento previo para dar arranque al piloto, por lo cual es posible proceder a desarrollo y montaje de los diferentes equipos.

Cabe tener en cuenta que las condiciones que fueron analizadas se toman como fuente de la empresa proveedora de membranas, en este caso 3M Colombia.¹

[1] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

3. PUESTA EN MARCHA

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN

En este capítulo se describe el sistema de ultrafiltración en detalle, en donde se mencionan los equipos necesarios, condiciones de operación, funcionamiento y métodos posibles de operación.

Este capítulo trata acerca de las limpiezas que debe tener el sistema para evitar ensuciamientos, daño de membranas y reducción de vida útil del sistema. También se comentan las capacitaciones necesarias para la implementación del sistema con ayuda de asesores y directores de tesis.

3.2 CONSIDERACIONES IMPORTANTES

Teniendo en cuenta que para el sistema UF a utilizar no se necesita un tratamiento preliminar de agua, se puede proceder a determinar condiciones de montaje y puesta en marcha del proyecto, para ello se hace necesario conocer y tener claridad en el funcionamiento de una ultrafiltración convencional.

El desarrollo de un buen sistema UF depende de un trabajo detallado de ingeniería, por ello comprende diferentes variables que afectan de manera directa e indirecta el rendimiento de la membrana. La calidad del agua de alimentación (ver tabla 6), la presión, la temperatura y la calidad del agua son propiedades que cobran gran importancia en el sistema debido a que un mal manejo de estos puede generar problemas catastróficos durante la prueba piloto, por ejemplo, el rompimiento de la membrana.¹La calidad de agua y flujo en el proceso son las variables a modificar con el fin de garantizar una baja presión transmembrana y buena calidad de agua tratada.

3.2.1 Equipos principales. Para el montaje y puesta en marcha del piloto se debe contar principalmente con equipos como

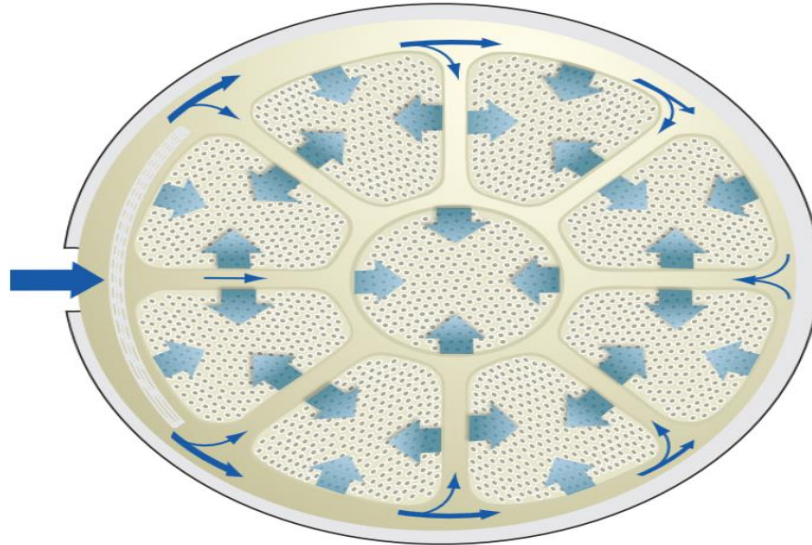
- Bomba de alimentación: encargada de llevar agua con presión suficiente y adecuada lo que permite garantizar calidad en el permeado sin afectar la estructura de la membrana.
- Bomba de retro lavado: su función es utilizar agua ultra filtrada para remoción de partículas acumuladas en la estructura porosa de la membrana.

[1] DAVID L.RUSSELL, tratamiento de aguas residuales enfoque práctico, editorial Reverté, Barcelona.

- Panel de control: garantiza manejo de todas las operaciones realizadas por el piloto incluyendo el accionamiento de la bomba de alimentación y retro lavado.
- Tuberías: función principal de transporte del fluido a tratar hacia la membrana y fluido tratado a almacenamiento o reúso.
- Válvulas: regulan el paso de agua a la membrana teniendo en cuenta el proceso que se quiera desarrollar, si ultra filtrar o retro lavar.
- Membrana 3M: Desarrolla el proceso físico de filtración por medio de su estructura de fibra hueca con micro poros que garantizan agua de alta calidad en su corriente de salida.

3.2.2 Diseño Interior del Módulo Liqui-Flux. Generalmente los módulos están compuestos por membranas en un contenedor el cual está a presión con el fin de optimizar la disposición en su interior y ganar espacio, estos módulos compuestos por una membrana extensa, son de 320mm (ver imagen 5) de diámetro. La finalidad de un espacio reducido es la de asegurar una baja caída de presión durante el retro lavado.

Figura 5. Interior membrana



Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

3.2.3 Diseño Exterior del Módulo Liqui-Flux. Las carcasas de los módulos Liqui-Flux tiene estándares de calidad muy altos ya que deben tener una durabilidad y rendimiento a nivel industrial que logre una vida útil larga (7 a 10 años) y un buen funcionamiento del proceso. El principal objetivo de los diseñadores de membrana es obtener un diseño robusto y versátil, junto con una disposición optimizada de las membranas en el interior empacadas a presión.²

Los materiales más utilizados para la carcasa de la membrana son: Polisulfona, FRP, Acero Inoxidable y PVC.

3.2.4 Conexión Variable. Para una fácil instalación, los módulos de ultrafiltración vienen con uno o dos puertos de filtrado y tapas con puerto axial o radial en los extremos (ver imagen 6). En donde el axial es un movimiento en dirección del eje de rotación y el radial es cuando el flujo es perpendicular al eje.¹

Figura 6. Conexión de un módulo radial



Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

3.3 OPERACIÓN MÓDULOS

Para la operación de los módulos se requieren respetar todas las pautas y condiciones indicadas en los límites y hoja de datos técnicos de la membrana para garantizar el buen funcionamiento y una vida útil, estos son:

[1] MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: *Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016*

- No exceder límites de temperatura, presión que deben estar registrado en la hoja de datos técnicos.
- Evitar el ingreso de sustancias abrasivas
- Usar un pre filtro adecuado para el proceso
- No exceder la presión transmembrana
- Evitar cambios grandes de presión, vacíos y golpes de ariete
- Evitar la precipitación y deposición de sustancias orgánicas
- Usar el filtrado solo para lavar la membrana y no exceder los límites de flujo
- Usar los químicos aprobados y a las concentraciones permitidas
- No exceder la temperatura máxima del químico que es de 40°C
- Evitar sobredosis de coagulantes en caso de ser necesarios.

3.3.1 Limpieza Especial (CIP). Después de realizar el retro lavado regular, si el flujo no tiene el rendimiento esperado, se debe realizar una limpieza a los módulos con sustancias químicas los cuales deben estar en la hoja técnica con sus debidas concentraciones. Para la correcta limpieza de la membrana se debe seleccionar el químico adecuado y la cantidad necesaria.

Esta limpieza consiste en realizar osmosis inversa con permeado. Se puede usar filtrado si es lo suficientemente blando (una acumulación de fácil remoción). El agua blanda requiere de concentraciones químicas bajas y un consumo de químico menor.

Tabla 10. Límites para limpieza
Requisitos de la UNIDADES
Calidad del agua
para todos los
pasos de enjuague
y limpieza

Partículas, solidos	Ninguno
Fe, Mn, Al	<0.1ppm
Silicio	<10ppm
Silicio Coloidal	No detectable
Dureza total	<1° dH (dureza alemana)
Turbiedad	<0.5 NTU
Aceite, grasa	0

Fuente: *Elaboración propia*

Está información de limpieza química descrita es para un procedimiento CIP típico y se proporciona solo a modo de guía. Dado que el tipo y la cantidad de químicos, el tiempo de reacción y la calidad del agua pueden variar por lo que la persona

encargada de controlar y diseñar el sistema UF debe realizar un análisis y determinar con exactitud estas variables.

3.3.2 Proceso de limpieza in situ (CIP). Para realizar la limpieza CIP de la membrana se debe seguir el siguiente orden:

- Lavado con agua: Consiste en llenar el tanque de CIP y el sistema con agua. Dejar circular agua del lado del lumen por 10 minutos a 60-80 l/m²/h.
- Limpieza Alcalina: Agregar una solución de limpieza alcalina al 0.1-1% en un recipiente de CIP. La dosis del químico se debe tener en cuenta el volumen de llenado y las tuberías.
- Lavado intermedio: Realizar un lavado como en el paso 1 a 30-40°C
- Lavado ácido: Se debe neutralizar la solución alcalina por lo que se agrega una solución ácida al 0.1-1%. Se debe dejar circular de 30-60 minutos a 60-80 l/m²/h a 40°C.
- Lavado final con agua: Finalmente se realiza un lavado nuevamente con agua.

3.4 INSTALACIÓN EN LA PLANTA

La planificación y configuración de un sistema de membrana en plantas debe ser muy cuidadoso. Los módulos no pueden someterse a ningún esfuerzo mecánico, se deben evitar vibraciones y las expansiones relacionadas con la temperatura.

3.5 PROCEDIMIENTO DE PARADA DEL SISTEMA

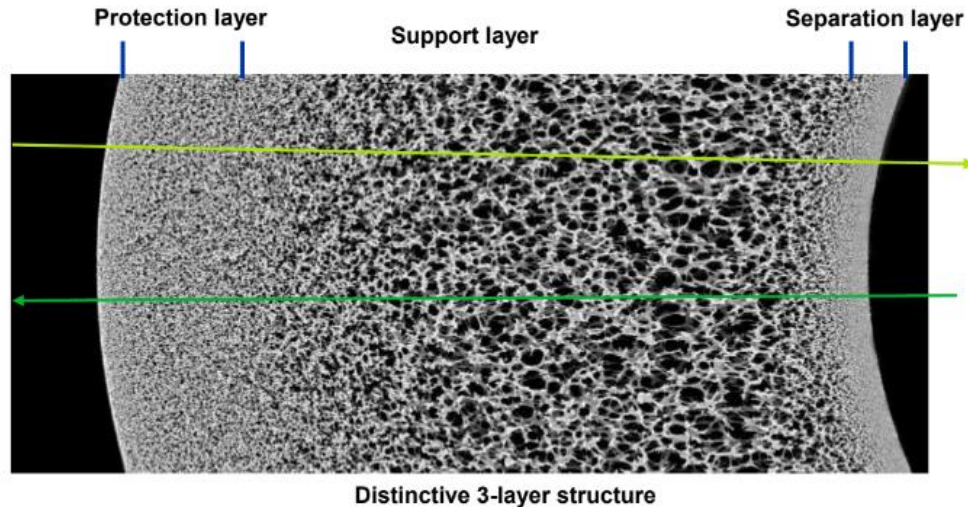
Se debe evitar o minimizar el crecimiento de bacterias durante la inactividad del sistema.

Estas paradas se realizan después de cada operación y dependiendo de si el fluido que paso por el sistema es muy contaminante o no. Las paradas van directamente relacionadas con el uso del sistema y los fluidos.

- Parada por menos de 24 horas: Antes de detener el sistema se debe realizar un retrolavado o filtrado de mínimo 60 segundos a 250 l/m²/h
- Parada por más de 24 horas y menos de 7 días: Filtrar una vez al día durante 10 minutos como mínimo 40-50 l/m²/h y luego realizar un retrolavado con filtro y agregando 1 ppm de cloro activo de Cloruro de sodio (NaOCl).
- Parada por más de 7 días: Se debe remover las capas de materia orgánica e inorgánica acumuladas en las membranas y realizar un retrolavado con químicos. El pH de cada membrana debe estar en un rango de 10.5 y 11.

3.6 FUNCIONAMIENTO

Figura 7. Membrana



Fuente: 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: *Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016.*

La estructura de la membrana se basa en 3 capas: de protección, soporte y separación cada una con funciones diferentes y tamaño de poro diferente (ver Figura 7).

Los sistemas UF por lo general tienen dos tipos de funcionamiento según su flujo, en la Figura 7., se evidencia una línea de color amarillo, la cual hace referencia al flujo de la parte de afuera de la membrana hacia dentro, y la línea verde representa el funcionamiento de adentro hacia afuera, como lo hace la membrana 3M a utilizar en el piloto. El funcionamiento de adentro hacia afuera garantiza que el piloto va a generar acumulación de contaminantes en la capa de separación, razón por la cual tan solo con un retro lavado de agua ultra filtrada se puede garantizar remoción de contaminantes y por lo tanto alargamiento de la vida útil de la membrana, de allí que se hace necesario utilizar una bomba de retro lavado.

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: *Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016*

Tabla 11. Características de la membrana

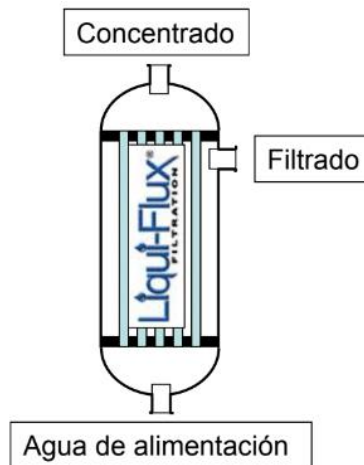
Características de la membrana	Condiciones
--------------------------------	-------------

TIPO DE MEMBRANA	Fibra hueca dentro-fuera
MATERIAL	Polyethersulfone
DIAMETRO exterior/interior	1,2mm / 0,8 mm
PRESION DE ROTURA	> 1200 kPa (174 psi)

Fuente: *Elaboración propia*

La Tabla 10. representa las principales características de la membrana, indispensables en el montaje ya que es con base a ella que se hace la elección de diferentes equipos y propiedades de operación. El uso de fibra hueca como material principal en las diferentes capas de la membrana, tiene como objetivo poder manejar diferentes tamaños de poro en el interior, asegurando así mejor calidad de filtrado y menor acumulación. La presión de rotura hace referencia a la máxima carga de presión que puede llegar a manejar la membrana, al superarlo se llega a fractura y es imposible la recuperación de la membrana, de allí la importancia de la buena selección y manejo de las bombas a utilizar.

Figura 8. Funcionamiento

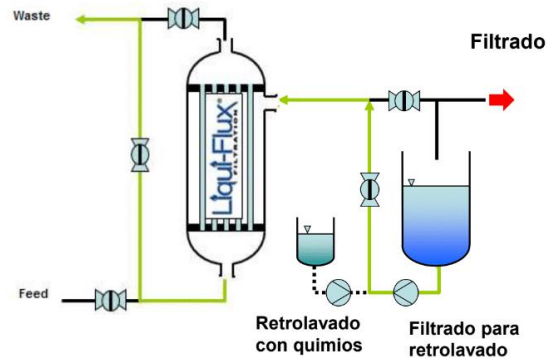


Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

El flujo de agua en una membrana UF se hace desde abajo hacia arriba, el agua como primera medida va desde la zona de alimentación (ver Figura 8.) pasando por el concentrado si y solo si es necesario (no en este caso) y se obtiene agua de alta calidad en la zona de filtrado (Figura 8.). El tipo de funcionamiento genera diferentes

ventajas al proceso de ultra filtración ya que de este dependen factores como retro lavado y el uso de diferentes productos químicos para mantener la membrana en buen estado.

Diagrama 3. Ultrafiltración



Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

El Diagrama 3., muestra el funcionamiento del piloto de ultrafiltración teniendo en cuenta zona de retro lavado con dos diferentes posibilidades dependiendo del agua a ultra filtrar; según la caracterización desarrollada (ver tabla 3), no se cuenta con agua de alto grado de contaminación tomando como guía la resolución 2115 (ver tabla 2), razón por la cual la utilización de productos químicos en este caso no es necesaria, haciendo más sencillo el montaje del piloto.

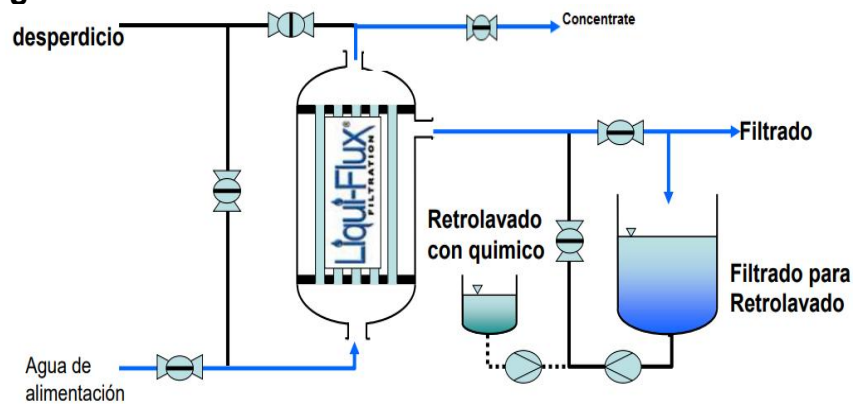
3.7 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ULTRAFILTRACIÓN

La ultrafiltración tiene gran gama de aplicaciones como producción de agua potable, pre-tratamiento de OI, reciclado de efluentes de aguas residuales, tratamiento de aguas de proceso. Tiene como objetivo seguridad higiénica en varios aspectos y la eliminación de ultrafiltración total de sólidos en suspensión, eliminación parcial de COT, DQO, DBO y eliminación de materia biológica con patógenos como bacterias.

Una membrana UF tiene dos métodos de operación en proceso:

3.7.1 Flujo cruzado. Este método de operación se caracteriza por la alta velocidad con la que el fluido atraviesa su superficie; el fluido al tener contacto directo con la membrana genera turbulencia cambiando el estado a turbulento, lo cual no permite la acumulación de todas las partículas en la membrana, pero no alcanza a remover la totalidad de las partículas, de allí nace la necesidad en este proceso de recircular el agua alimentada según requerimientos del líquido a tratar. Este método tiene como gran ventaja que debido a la alta velocidad, el gasto de productos químicos para su mantenimiento (CEB) disminuye en gran proporción, siendo en algunos casos incensario, sin embargo, la principal desventaja que consigna este método de operación UF es el gasto energético que se requiere para realimentar la membrana y garantizar calidad en el proceso; el tiempo en este caso se convierte en una variable importante ya que se requiere mayor disposición para utilizar este método, además de tuberías y capacidad de equipos que aumentan la inversión inicial del proceso.

Figura 9. Cross flow



Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

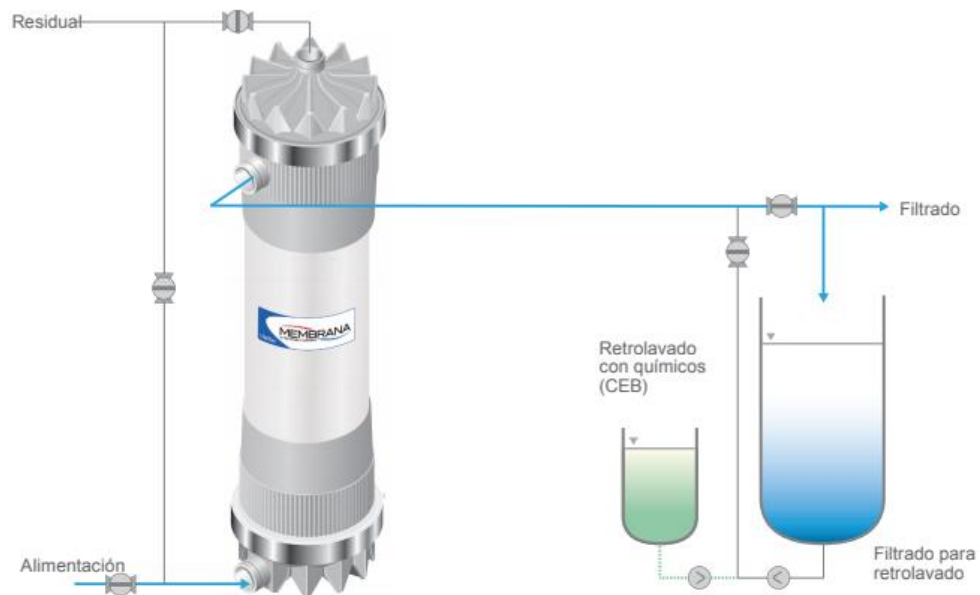
La Figura 9., muestra un modelo UF en el cual su operación se da por flujo cruzado, del cual se pueden evidenciar diferentes características del mismo como:

- Presencia de concentrado
- (CIB) Retro lavado con químico
- Corriente de rechazo

3.7.2 Modo dead-end. Este modo de operación se caracteriza porque a diferencia de flujo cruzado no hay circulación del líquido a filtrar. La presión es el factor relevante en este caso ya que es la encargada de llevar el fluido hasta la membrana, pasando por el interior de la membrana hasta la carcasa.

El modo dead-end tiene diferentes aplicaciones a nivel industrial debido al bajo costo energético que este maneja, en potabilización de aguas es un método muy efectivo teniendo cuidado con la alimentación del sistema, ya que exige la ausencia de contaminantes fuertes, de allí que para aguas de superficie presentan una gran aplicabilidad.

Figura 10. Dead-end



Fuente: MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

La Figura 10., muestra el funcionamiento dado en un sistema UF con modo de operación dead-end donde se resalta la no concentración de agua debido a que el sistema no se caracteriza por tratar aguas agresivas, razón por la cual la energía requerida es menor.

1.MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

3.8 CAPACITACIONES

3.8.1 Selección de bombas. La selección de la bomba en un proceso UF es un factor clave en su montaje y puesta en marcha, para ello se toman capacitaciones con empresas especializadas en el área; la empresa Dp watering se ayuda en este caso con su proveedor de bombas Grundfos Colombia, esta multinacional pone a servicio diferentes capacitaciones en las cuales muestran factores importantes en la selección del equipo a utilizar, para ello proporcionan un software especializado a sus clientes, el cual se encarga de seleccionar la bomba según las condiciones de entrada y tanto la necesidad del cliente como del proceso.

El software con el cual se realiza la selección de bombas lo ofrece la empresa grundfos en su página web y con el cual a partir de flujos y tipos de fluidos se da la mejor opción de bombas y la cantidad de estas.

3.8.2 Productos químicos en membranas. La capacitación otorgada por la multinacional King lee brinda información acerca del mantenimiento y alargamiento de vida útil en membranas, a pesar de que el agua no contiene alta concentración de contaminantes agresivos, la membrana requiere periódicamente el uso de diferentes productos seleccionados según el agua tratada en la UF. La soda caustica NaOH es un producto que encuentra gran aplicabilidad en mantenimiento y limpieza de membranas, siendo este el producto utilizado por la empresa en sus procesos de ultrafiltración con características similares a las del agua del sector alimenticio; también es importante definir el periodo en el cual se debe desarrollar el mantenimiento y para ello la empresa King Lee pone a disposición ingenieros que colaboran en el proceso, debido a que Dp watering es distribuidor autorizado de sus productos.

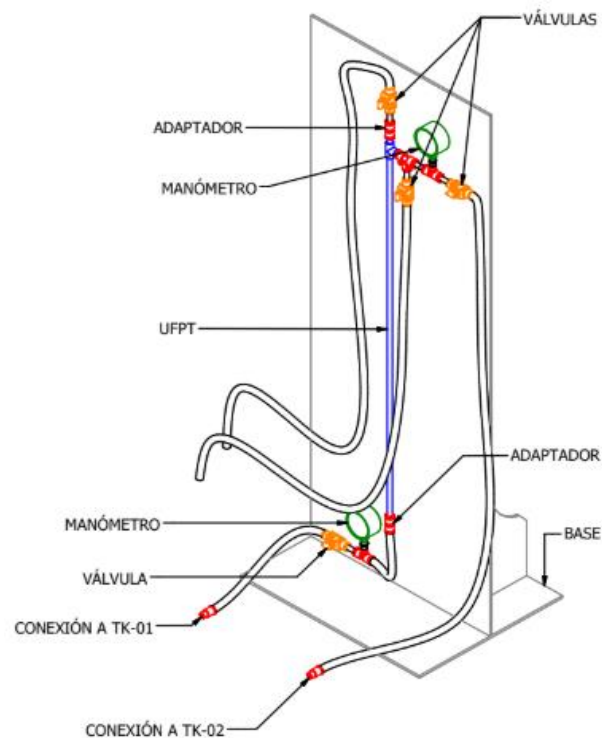
3.9 MONTAJE

Para el desarrollo del sistema piloto UF compuesto por montaje y puesta en marcha, se requiere un diagrama P&ID el cual sirve como guía y permite seguir pauta e identificar características principales que todo sistema debe tener al desarrollar una ultrafiltración.

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

Figura 11. Piloto



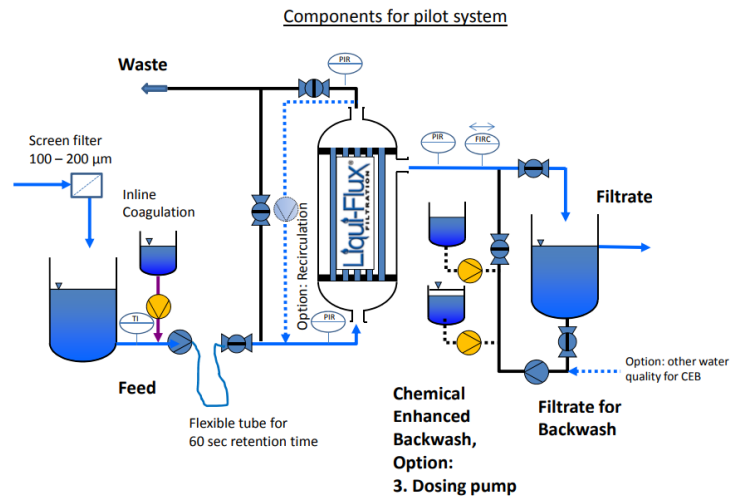
Fuente: *Dp Watering*

Un diagrama del piloto ayuda al montaje con diferentes consideraciones, en especial para posicionamiento de los equipo y tuberías, las cuales tienen gran importancia en el correcto funcionamiento de la membrana según el tipo de operación a realizar, por ejemplo, la Figura 11., da a conocer posicionamiento de válvulas en las salidas y entradas de la membrana, las cuales guían el proceso, bien sea ultrafiltración o retrolavado de agua ultrafiltrada.

La figura 11. también muestra la estructura completa que se debe lograr en el piloto, con los equipos necesarios a utilizar y el aspecto general que debería llevar el sistema

En el Diagrama 4., se encuentra las principales corrientes del proceso y los equipos a utilizar además que posicionamiento de bombas, tanques, membrana y válvulas. Los indicadores allí estipulados son en su mayoría para determinar la presión en cada uno de los puntos importantes del sistema. El desarrollo del diagrama 3 es indispensable en el montaje de este proceso, por eso para su diseño se debe tener claridad en aspectos importantes como el funcionamiento y principios de un proceso UF.

Diagrama 4. Componentes



Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

El diagrama 5., muestra cómo se debe realizar un montaje UF independientemente del sistema UF a evaluar, se evidencian tanques, bombas y posibles procesos de mantenimiento con producto químico si es necesario.

4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 DISEÑO DE EXPERIMENTAL # 1

Para el montaje y la experimentación con el piloto se realizan varias pruebas con el fin de ajustar todas las condiciones del proceso de la manera más adecuada y obtener los mayores resultados de remoción, garantizando la mejor calidad del agua. Además, la buena elección de condiciones de operación permite una buena limpieza de la membrana y de este modo alargar su vida útil.

Para el proceso existen 6 condiciones a tener en cuenta, de estas, 4 son constantes: flux de entrada del agua, la temperatura del proceso, el área de la membrana y la presión. Mientras que la cantidad de coagulante en la entrada y el tiempo son variados durante la experimentación. La variable respuesta es el flujo de salida y la calidad de agua a la salida del proceso.

Las variables se irán ajustando con el fin de obtener los resultados deseados, en donde se medirá según la calidad del agua a la salida y el flujo de salida del agua del sistema teniendo un volumen fijo. Este tiempo debe estar entre 5 y 40 minutos, el cual ira aumentando con el paso del agua ya que la membrana se irá ensuciando, por lo que el filtrado disminuirá. El no cumplimiento de este tiempo indicara que hay algún problema con el proceso.

Estas variables fueron elegidas ya que con estas se obtendrán mejores resultados a nivel del sistema que puedan evidenciar de una manera más notoria la alta remoción de un sistema de ultrafiltración en aguas residuales con estas características.

Tabla 12. Variables y constantes

CONSTANTES	VARIABLES INDEPENDIENTES	V. DEPENDIENTES
Flujo entrada	Cantidad de coagulante	Flujo salida
Temperatura	tiempo	Calidad
Área		
Presión		

Fuente: *Elaboración propia*

Para el desarrollo experimental se plantea un paso a paso, en el cual se identifican las principales variables del proceso, las variables respuesta y el diseño que se va a utilizar, este paso a paso es importante para tener claridad tanto en el desarrollo del experimento (ejecución) como en las respuestas obtenidas (análisis).

Tabla 13. Variable respuesta

Nombre	Unidades	Objetivo
Flux salida	L/mh	Maximizar
calidad	NTU	Minimizar

Fuente: *Elaboración propia*

En la tabla 13., se muestran las condiciones de las variables respuestas flux de salida y calidad, teniendo en cuenta que se tiene como objetivo maximizar su valor y lograr que el tiempo de filtración sea mínimo, para ello la cantidad de coagulante juega un papel de vital importancia.

En cuanto a la calidad del agua, el factor diferencial que permite conocer si el agua tratada cumple con condiciones esperadas es la turbidez, la cual es medida por medio de un turbidímetro, esperando un valor menor a 0,5 NTU^{1,2}, en caso contrario es necesario modificar las condiciones de operación en el sistema ya que no se está logrando la remoción esperada y el agua de salida no podría ser reutilizada.^{1,2}

Tabla 14. Variables manipuladas

NOMBRE	UNIDADES	TIPO	PAPEL	NIVELES
Tiempo	Minutos	Categorico	controlable	5,10,15,20,25,30,35,40
Coagulante	ppm	Categorico	controlable	0,1,2

Fuente: *Elaboración propia*

El modo de operación dead-end genera ventajas para esta experimentación, teniendo en cuenta que el agua a tratar no es considerada agua agresiva según la caracterización realizada.

El coagulante se evalúa en tres diferentes concentraciones, estos valores son definidos teniendo en cuenta que normalmente en un proceso UF se utilizan concentraciones bajas de coagulante.³

[1] DAVID L. RUSSELL, tratamiento de aguas residuales enfoque práctico, editorial Reverté, Barcelona.

[2] SOLIS C. CARLOS, Tecnología de membranas: Ultrafiltración, Universidad del Valle, Cali Colombia, 2017.

[3] DP WATERING, Jardines de los Andes, Fernando Gordillo, Bogotá, 2011.

La tabla 14., muestra que la variable a manipular es la cantidad de coagulante, esta modificación altera la calidad de agua a la entrada de la membrana, haciendo más fácil su operación ya que previamente puede atrapar materia orgánica que se disuelve dentro de la membrana. En cuanto al tiempo es una variable que se puede monitorear y permite obtener datos de flujo un tiempo no mayor a una hora.

Tabla 15. Diseño experimental

DISEÑO	ALEATORIZADO	REPLICAS	TOTAL EJECUCIONES	TOTAL BLOQUES
Factorial	si	1	24	1

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15. Se identifica el diseño que se utiliza en la experimentación, es un diseño factorial por bloques que permite comparar varios tratamientos al mismo tiempo, esto beneficia al proyecto ya que se quiere comparar e identificar el modo de operación más viable para el piloto con membrana.

El número de repeticiones según las variables a manipular son 24 (ver Tabla 15), estas se dan debido a las posibilidades que se pueden llegar a presentar en el experimento teniendo en cuenta los rangos que se manejan y los posibles datos que se pueden obtener.

La Tabla 15 muestra las ejecuciones que se pueden dar, es esta tabla la que guía el desarrollo experimental y la toma de datos del mismo, por medio de ella se identifica la mezcla de datos y se logra correlacionar cada una de las variables y así identificar el peso que cada una tiene dentro de un sistema UF operando en modo de dead-end.

El número de iteraciones que se realiza en la experimentación por medio del piloto son 24, donde cada una de las concentraciones utilizadas requiere un tiempo de desarrollo de 40 minutos (tiempo máximo de operación).

El desarrollo de la experimentación proporciona información importante en cuanto a cómo se deben modificar cada una de las variables dentro de un sistema de ultrafiltración convencional, en la planta del sector alimenticio ubicada en Sopó Cundinamarca.

[1] DAVID L.RUSSELL, tratamiento de aguas residuales enfoque práctico, editorial Reverté, Barcelona.

[2] SOLIS C. CARLOS, Tecnología de membranas: Ultrafiltración, Universidad del Valle, Cali Colombia, 2017.

[3] DP WATERING, Jardines de los Andes, Fernando Gordillo, Bogotá, 2011.

Tabla 16. Tabla experimental

BLOQUE	TIEMPO minutos	COAGULANTE ppm
1	5	0
1	10	0
1	15	0
1	20	0
1	25	0
1	30	0
1	35	0
1	40	0
1	5	1
1	10	1
1	15	1
1	20	1
1	25	1
1	30	1
1	35	1
1	40	1
1	5	2
1	10	2
1	15	2
1	20	2
1	25	2
1	30	2
1	35	2
1	40	2

Fuente: *Statgraphics*

La guía que es completada en el desarrollo experimental se evidencia en la Tabla 16., allí también se encuentran cada una de las interacciones, pero también cuenta con un espacio en el que se determina el valor numérico que toman cada una de las variables respuestas.

4.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Un proceso de ultrafiltración permite ajustar diferentes variables para posteriormente identificar el comportamiento de las mismas; en esta nueva experimentación se quiere evaluar el comportamiento del sistema al variar su flujo

de entrada. En este caso se cuenta con 2 constantes que son: temperatura del proceso y calidad de agua a la entrada del sistema, en cuanto a las variables modificables se encuentran el tiempo y el flujo de entrada a la membrana, de este experimento se analiza el comportamiento del caudal de agua ultra filtrada o flux de salida.

Al igual que en el diseño anterior se plantea un paso a paso para la realización del diseño de experimentos

Tabla 17. Variables respuesta 2

Nombre	Unidades	Objetivo
Flux salida	L/mh	Maximizar
calidad	NTU	Minimizar

Fuente: *Statgraphics*

En la tabla 17., se muestra la variable respuesta, en este caso el objetivo es maximizar el caudal de salida, para ello es importante tener en cuenta que este se ve afectado de forma directa con el caudal de entrada; por lo tanto, maximizar esta variable permite demostrar la viabilidad técnica del sistema UF.

Tabla 18. Variables manipuladas 2

NOMBRE	UNIDADES	TIPO	PAPEL	NIVELES
Tiempo	Minutos	Categórico	controlable	5,10,15,20,25,30,35,40
FLUX salida	L/m2h	Categórico	controlable	57,80, 100

Fuente: *Statgraphics*

Las variables que van a ser manipuladas y que permitirán identificar el comportamiento del sistema a lo largo de la experimentación, se evidencian en la tabla 18., en este caso el flujo de entrada tomara valores de 57, 80 y 1mh; se toman estos valores teniendo que en cuenta que la simulación muestra que 57 es el flujo mínimo para realizar el tratamiento de agua en la empresa del sector alimenticio ubicada en Sopó (ver anexo 1), la simulación se realiza en el programa Liqui-cad ya que este determina las condiciones iniciales; la empresa dp watering utiliza este simulador como guía del sistema UF a implementar. En cuanto al tiempo también se toma como base la simulación realizada (ver anexo 1), donde se muestra que la ultrafiltración debe ser desarrollada en un tiempo no menor a 40 minutos, razón por la cual se estudia en rangos de 5 minutos hasta alcanzar el valor máximo posible.

Tabla 19. Diseño experimental

DISEÑO	ALEATORIZADO	REPLICAS	TOTAL EJECUCIONES	TOTAL BLOQUES
Factorial	si	1	24	1

Fuente: Statgraphics

En la Tabla 19., Se identifica el diseño que se utiliza en la experimentación, es un diseño lineal por bloques y aleatorizado que permite comparar varios tratamientos al mismo tiempo, esto beneficia al proyecto ya que se quiere comparar e identificar el modo de operación más viable para el piloto con membrana.

Tabla 20. Posibilidades 2

BLOQUE	TIEMPO minutos	Flux L/m2h
1	5	57
1	10	57
1	15	57
1	20	57
1	25	57
1	30	57
1	35	57
1	40	57
1	5	80
1	10	80
1	15	80
1	20	80
1	25	80
1	30	80
1	35	80
1	40	80
1	5	100
1	10	100
1	15	100
1	20	100
1	25	100
1	30	100
1	35	100
1	40	100

Fuente: Statgraphics

En la tabla 20., se da a conocer las posibles combinaciones que se pueden dar entre las variables manipuladas en el experimento, obteniendo un valor respuesta de cada uno de ellos y además garantizando un estudio completo tomando como base los datos otorgados por la simulación de ultrafiltración.

Para el correcto desarrollo de la etapa experimental se hace necesaria la utilización de la tabla 19., debido a que en ella se encuentra la columna de la variable respuesta “FLUX SALIDA”, la cual es la variable a tener en cuenta y la que permite realizar conclusiones y deducciones del experimento.

4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL # 1

Para la experimentación del proceso se realizan etapas previas para poner a punto el sistema y así comenzar la experimentación, donde se realizan 6 pruebas. En las cuales se varía la cantidad de coagulante en 3 partes: sin coagulante, 1ppm de coagulante y 2 ppm de coagulante. Las siguientes 3 pruebas son variando el flux donde se usan 57,7, 80 y 100 lm^2/h .

4.3.1 Aforación. Para empezar, se debe aforar para encontrar los valores a los cuales debe operar la bomba. Para cumplir con la filtración del volumen deseado se conectan dos mangueras de $\frac{3}{4}$ pulgada de diámetro, una del agua cruda a una carcasa de micro filtración, se contabiliza un minuto en donde debe pasar el volumen obtenido del agua cruda a una probeta, el ensayo se desarrolla por prueba y error hasta que las rpm escogidas nos den el volumen necesario.

Figura 12. Aforación



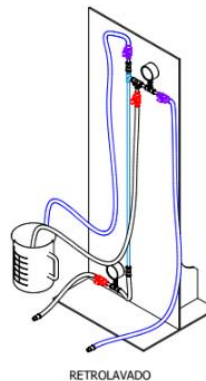
Fuente: *Elaboración propia*

Ecuación 1. Volumen

$$V [ml] = F\left(\frac{L}{m^2h}\right) * A(m^2) * \frac{1h}{60seg} * \frac{1000m L}{1L}$$

4.3.2 Retrolavado. Después de calcular las rpm con las que debe trabajar la bomba se realiza un retro lavado con agua limpia para limpiar el sistema y la membrana de cualquier suciedad. El retro lavado se realiza a 33 rpm donde se hace pasar agua limpia durante 1 minuto desde que cae la primera gota de agua por la corriente de rechazo.

Figura 13. Retrolavado



Fuente: Dp watering

$$V = 250 \frac{L}{m^2h} * 0,022m^2 * \frac{1h}{60 min} * \frac{1000ml}{1l} = 91,66ml$$

4.3.3 Enjuague. Como último paso se realiza un enjuague al sistema a 7 rpm el cual tiene como finalidad eliminar impurezas que el retrolavado no arrastró, garantizando el buen desarrollo del sistema UF.

Para la primera parte experimental se realizan 3 pruebas las cuales consisten en variar la cantidad de coagulante en el agua cruda.

Este procedimiento cobra gran importancia a la hora de realizar un sistema UF, teniendo en cuenta que cada proceso genera en la membrana ensuciamiento, esto obliga a los operadores de un sistema UF a realizar procedimientos como el enjuague y retrolavado que se encargan de garantizar y de mejorar la veracidad de los datos obtenidos en la corrida del sistema.

[1] DAVID L.RUSSELL, tratamiento de aguas residuales enfoque práctico, editorial Reverté, Barcelona.

[2] SOLIS C. CARLOS, Tecnología de membranas: Ultrafiltración, Universidad del Valle, Cali Colombia, 2017.

4.4 DESARROLLO

4.4.1 Sin Coagulante

Tabla 21. Resultados sin aplicar coagulante

ENSAYO					
tiempo(min)	peso(gr)	flux(lm ² /h)	peso (gr)	Flux (lm ² /h)	Error %
5	71	38,727	73	39,818	2,81715599
10	166	51,818	170	52,909	2,10544598
15	260	51,272	262	50,181	2,12786706
20	354	51,272	356	51,272	0
25	450	52,363	451	51,818	1,04081126
30	553	56,181	553	55,636	0,97007885
35	648	51,818	650	52,909	2,10544598
40	740	50,181	741	49,636	1,08606843

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 21., se muestran los resultados obtenidos a partir de agua cruda sin coagulante y la toma de datos durante 40 minutos. Se puede determinar que en 40 minutos y a una velocidad de la bomba de 7rpm se filtran 740 gramos de agua para la cual se obtiene un NTU de 0,37, el cual es un valor bueno teniendo en cuenta que para Organización Mundial de la Salud este valor debe estar por debajo de 1 NTU y permite obtener un agua de alta calidad.

4.4.2 1 ppm de coagulante. Para obtener una solución a la entrada con 1 ppm de coagulante, se aplica 1 mg de coagulante Quimpac 2800 por cada litro de agua.

Tabla 22. Diseño experimental 1ppm

ENSAYO					
tiempo(min)	peso(gr)	flux(lm ² /h)	peso (gr)	Flux (lm ² /h)	Error %
5	61	33,272	62	33,818	1,641
10	149	48	150	48	0
15	236	47,454	239	48,545	2,299

Fuente: *Elaboración propia*

Tabla 23. Continuación tabla 22

ENSAYO					
tiempo(min)	peso(gr)	flux(lm²/h)	peso (gr)	Flux (lm²/h)	Error %
25	412	48	413	48,545	1,135
30	500	48	499	47	2,897
35	589	48,545	590	49,636	2,2473
40	675	46,909	677	47,454	1,1618

Fuente: *Elaboración propia*

En la tabla 22., se muestran los resultados con 1 ppm de coagulante en 1 litro de agua cruda. Se puede determinar que se obtuvo menos agua (676) y un flux menor que sin coagulante (46,909), esto se puede presentar ya que el coagulante ayuda a retener mayor cantidad orgánica, por lo que la membrana se tapona con mayor facilidad e insolubiliza partículas del agua cruda.

4.4.3 2 ppm de coagulante. Para obtener 2 ppm de coagulante se aplica 7,7 ml del coagulante quimpac 2800 a 500 ml de agua cruda y se diluye, posteriormente se agregan 10 ml de la solución a 500 ml de agua cruda, para finalmente agregar 20 ml de la solución a 1000 ml de agua cruda.

Tabla 24. Diseño experimental 2ppm

ENSAYO					
tiempo(min)	peso(g)	flux(lm²/h)	peso (gr)	Flux (lm²/h)	Error %
5	59	31,690	58	31,636	0,170
10	147	37,689	148	39,09	3,717
15	231	41,698	233	42,363	1,594
20	321	42,000	324	43,636	3,895
25	410	43,240	414	44,09	1,965
30	491	44,689	493	45,09	0,897
35	578	44,985	580	45,454	1,042
40	669	45,632	670	46,09	1,003

Fuente: *Elaboración propia*

En la Tabla 24., se muestran los resultados con 2 ppm de coagulante en 1 litro de agua cruda. Se obtiene menor cantidad de agua filtrada y una disminución en el flux.

A continuación, se muestra un resumen de los datos obtenidos al aforar según la necesidad volumétrica de la membrana.

Tabla 25. Flujo

Flujo L/m²h	Coagulante(ppm)	NTU
57	0	0.39
57	1	0.46
57	2	0.49

Fuente: *Elaboración propia*

4.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTO #1

Se realiza el análisis experimental entre dos pruebas la inicial y la réplica para comparar entre ellas la dispersión que se pueda presentar y la coherencia frente a datos teóricos.

4.5.1 Sin coagulante. Se realizan las pruebas experimentales para el paso por el sistema de agua cruda sin ningún tipo de coagulante, en donde el agua de partida cuenta con un NTU de 6.6 y con ciertas partículas que se ven claramente en el agua a tratar.

El flujo con el que trabaja la bomba en el proceso es de 57 L/m²h, el cual es constante durante la experimentación con coagulante.

Para la primera prueba experimental sin coagulante se presenta un pico en el tiempo 30, en donde la membrana llega a su máximo punto por lo que llega a la saturación y los datos de flux siguientes presentan una disminución, ya que la membrana al estar tapada no permite el paso del agua de la misma manera.

La réplica de la experimentación de agua cruda al sistema sin coagulante permite tener una mayor claridad de los datos obtenidos en la primera experimentación y corroborar que los datos obtenidos son veraces, debido a que los flujos van creciendo y hay un intervalo donde se presenta la saturación de la membrana. Presenta su pico más alto en 30 minutos donde alcanza un flux considerable de agua filtrada.

Tabla 26. Promedio experimentación y replica sin coagulante

Tiempo(min)	Flux promedio (L/m²h)
5	40,090
10	52,363
15	55,363
20	50,727
25	52,636
30	55,090
35	51,545
40	54,545

Fuente: Elaboración propia

La tabla 26 muestra el promedio de la experimentación sin coagulante y su réplica, las cuales presentan una baja dispersión y valores similares, los resultados de flujo para cada uno de los experimentos reflejan un comportamiento similar en los diferentes rangos de tiempo.

Presenta el promedio de los datos obtenidos de la experimentación sin coagulante y su réplica. Los cuales presentan un pico en el tiempo 30 a causa de un taponamiento de la membrana, por lo que el flux a partir de ese tiempo disminuye y reduce la cantidad de agua filtrada.

Tabla 27. Comparación calidad CALIDAD (NTU)

EXPERIMENTO	0,37
RÉPLICA	0,4

Fuente: *Elaboración propia*

La tabla 27 compara los valores de NTU del primer experimento y de su réplica en donde ambos presentan valores bajos y que cumplen con los estándares mínimos para que el proceso sea de alta calidad el cual es un NTU por debajo de 0.5.

Se parte de un valor de NTU 6.6 por lo que se presentan una gran diferencia frente al agua filtrada y se cumple con lo deseado.

Obtener un valor de turbidez tan bajo demuestra que se recupera la claridad de agua y la eliminación de partículas en suspensión, así como un mejor aspecto estético.

4.5.2 1 ppm de coagulante. La experimentación con coagulante se realiza con Quimpac 2800 un coagulante que insolubiliza y permite la acumulación de materia orgánica lo que genera mayor acumulación en la membrana, pero arrastra la materia a un solo lugar.

Se muestra que el flux durante 40 minutos, en donde se presentan un comportamiento similar a excepción de los primeros valores, lo que permite concluir que la adición de coagulante insolubiliza partículas en el agua y que en 40 minutos la membrana se ha ido llenado de sedimentos poco a poco sin llegar a su saturación.

En la réplica de la experimentación con 1ppm en el agua cruda y a un flujo de 57 L/m²h se obtiene valores muy similares a la primera prueba por lo que permite determinar que los valores tienen cierta coherencia. La membrana a lo largo de los 40 minutos presenta valores cercanos y en el tiempo 40 el flujo disminuye por la materia acumulada en la membrana lo que interrumpe el paso de agua a la misma velocidad.

Tabla 28. Promedio experimentación 1ppm

Tiempo(Min)	Flux(L/m²h)
5	33,545
10	48
15	48
20	47,181
25	48,272
30	47,454
35	49,090
40	47,181

Fuente: *Elaboración propia*

La tabla 28 muestra el promedio de los Flux en el primer experimento y su réplica, en donde se notan valores similares a excepción del primer dato el cual habitualmente es diferente a los demás ya que es la primera muestra, esto se da a razón de que en el primer dato no hay acumulación y no se puede reflejar el comportamiento que la membrana tiene al tratar el agua cruda.

Se muestran los resultados de la comparación de la experimentación con una 1 ppm de coagulante y su réplica correspondiente, para la cual se obtiene valores muy similares y se puede concluir que a excepción del primer valor en el tiempo 5 son muy cercanos y hay una leve disminución del flujo al final del tiempo.

Tabla 29. Comparación calidad
CALIDAD
(NTU)

EXPERIMENTO	0,45
RÉPLICA	0,46

Fuente: *Elaboración propia*

La tabla 29 presentan valores muy cercanos y cumplen con los requerimientos mínimos de menor a 0.5 NTU por lo que el aspecto y la claridad del agua son de alta calidad después de la ultrafiltración.

4.5.3 2 ppm de coagulante. Esta experimentación se realiza con 2 ppm de coagulante Quimpac 2800 diluido en el agua cruda para lograr la solución con esta cantidad.

Se muestra un aumento de Flux a medida que aumenta el tiempo y en el tiempo de 30 a 40 minutos valores muy similares. Por lo que la acción del coagulante ha favorecido un flux en cierta parte constante y la membrana en los 40 minutos no ha llegado a la saturación.

La réplica de la experimentación con 2 ppm da valores muy similares a la primera experimentación, en donde el flux es casi constante en gran parte del tiempo y el coagulante cumple con su función.

Tabla 30. Promedio experimentación y replica 2ppm
Tiempo(Min) Flux(L/m2h)

5	31,667
10	38,390
15	42,181
20	42,662
25	43,665
30	44,890
35	45,219
40	45,861

Fuente: *Elaboración propia*

La tabla 28 muestra el promedio de los flux entre la primera experimentación y la réplica y presenta una similitud entre los datos obtenidos. Constatando cierta veracidad entre ellos.

La comparación de la primera experimentación con 2ppm y la réplica, donde se presentan valores muy similares y una dispersión pequeña. Por lo que se puede verificar que hay una coherencia entre las dos pruebas.

Tabla 31. Comparación calidad CALIDAD (NTU)

EXPERIMENTO	0,48
RÉPLICA	0,49

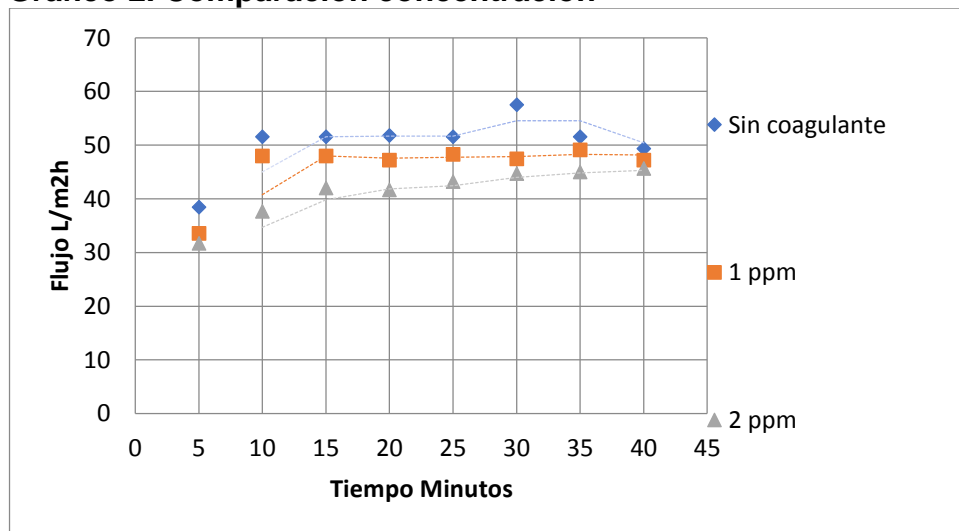
Fuente: *Elaboración propia*

La tabla 31 presenta los resultados obtenidos de la turbidez del experimento y la réplica dando valores similares y por debajo de 0,5 NTU por lo que el agua es de alta calidad y visiblemente es transparente y un buen aspecto.

4.6 ANÁLISIS FINAL

Se muestra el promedio de la primera experimentación y la réplica, donde se presentan valores casi constantes del tiempo 20 al 40, en donde no hay un aumento significativo del flux en el proceso, por lo que se puede evidenciar que la adición de coagulante interrumpe la saturación de la membrana, pero disminuye los flux de agua filtrada, ya que el coagulante insolubiliza muchas partículas y disminuye el tiempo de saturación. Al disminuir los flux en el proceso indica que en cada determinado intervalo se está obteniendo menos cantidad de agua filtrada, pero el momento en que la membrana ya no pueda filtrar y sea necesario realizar un lavado se retrasará.

Gráfico 2. Comparación concentración



Fuente: *Elaboración propia*

El gráfico 2., muestra los resultados del promedio de las 3 experimentaciones en donde se muestra notoriamente que el experimento sin coagulante presenta un pico en el tiempo 30, donde hay una saturación de la membrana y el flujo de agua filtrada

empieza a disminuir. La experimentación con 1ppm y 2 ppm de coagulante tiene comportamientos similares, aunque con 1 ppm se alcanzan valores mayores de flujo desde el inicio (10 minutos). En estos dos hay valores de flujo constantes y por debajo que, sin coagulante, porque se acumulan en la membrana de manera constante y se insolubilizan muchas partículas.

A partir de la experiencia de la empresa y los resultados obtenidos se interpreta que normalmente la membrana se satura en tiempos cortos al aumentar la concentración de coagulante.

4.7 DESARROLLO EXPERIMENTAL # 2

Al desarrollar pruebas por medio de un piloto de ultrafiltración se debe tener en cuenta diferentes consideraciones importantes al empezar con la fase experimental, para ello se determina una secuencia:

- Toma de muestras
- Aforar
- Retrolavado
- Enjuague
- Experimentación

4.7.1 Toma de muestras. Teniendo en cuenta que lo que se quiere es demostrar la viabilidad de un proceso UF como etapa posterior al vertimiento que actualmente genera una PTAR en Sopó, las muestras de agua deben ser tomadas directamente del canal de vertimiento de la PTAR.

Figura 14. Salida PTAR



Fuente: *Elaboración propia*

En la figura 14., se identifica el canal de vertimiento de la planta de tratamiento, es allí donde se debe realizar el proceso de muestreo, teniendo en cuenta que esta corriente de agua se puede llegar a reutilizar si cumple con la normatividad esperada por la empresa.

Figura 15. Toma de muestra



Fuente: *Elaboración propia*

La toma de muestra de agua se hace directamente del canal de vertimiento (ver figura 15), se realiza con garrafones de 5 galones, teniendo en cuenta que es un volumen de agua suficiente para realizar la posterior prueba de ultrafiltración.

4.7.2 Aforar. En esta etapa lo que se busca es garantizar que a la entrada de la membrana llegue el caudal necesario en las diferentes etapas del proceso (retro lavado, enjuague y experimentación). Cada uno de los modelos utilizados y proporcionados por la empresa 3M tienen una ficha técnica, en este caso la membrana que se utiliza tiene un área de $0,022 \text{ m}^2$, este dato es de suma importancia para determinar la potencia con la que la bomba garantiza la entrada del caudal al equipo.¹

Para el retrolavado la membrana necesita un flujo de $250 \text{ l/m}^2\text{h}$ como mínimo, en este caso se utiliza la Ecuación 1. Para determinar el flujo que se mueve en un minuto con un caudal de $250 \text{ l/m}^2\text{h}$.¹

Ecuación 2. Volumen 2

$$V = F * A * \frac{1}{60} * \frac{1000}{1}$$

Donde A es el área de la membrana utilizada, F el flujo requerido y V el volumen en ml que pasa en un minuto.

4.7.3 Retrolavado. La etapa de retrolavado permite el funcionamiento óptimo de la membrana, eliminando impurezas y demás que generen acumulación en el equipo, la empresa proveedora aconseja un retrolavado para cada experimento.

Figura 16. Retrolavado experimental



Fuente: *Elaboración propia*

En la figura 16., se evidencia el funcionamiento de la etapa de retrolavado, para ello se utiliza la corriente de rechazo y la de lavado (ver figura 18), de igual forma se utiliza la micro filtración para evitar acumulación y posterior fractura de la membrana.

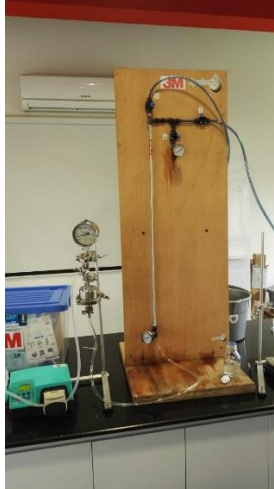
$$V = 250 \frac{L}{m^2h} * 0,022m^2 * \frac{1h}{60 \text{ min}} * \frac{1000mL}{1l}$$

$$V = 91,66mL$$

En el caso del retrolavado con agua limpia la membrana utilizada necesita que a su entrada se tenga un flujo de 91,66 ml.

4.7.4 Enjuague. Para desarrollar la etapa de enjuague se debe tener en cuenta que la bomba debe tener y estar configurada con las rpm calculadas anteriormente, debido a que debe realizar con el mismo modo de operación. La etapa de enjuague es importante antes de realizar la operación, ya que en esta etapa se eliminan todas las impurezas que el retro lavado no alcanza a eliminar.

Figura 17. Enjuague



Fuente: *Elaboración propia*

En la figura 17., se muestra la operación del enjuague, en el cual básicamente se realiza la misma operación de una UF convencional, se diferencia debido a que el agua utilizada para el enjuague es agua limpia, con el fin de no afectar la estructura interna de la membrana y evitando posibles acumulaciones.

Para este paso se necesita utilizar la ecuación 1,2, pero se tiene en cuenta que para el enjuague de una membrana UF se necesita un flujo de agua limpia igual al flujo de operación; por ende y teniendo en cuenta que esta es una variable modificada durante el experimento con tres diferentes niveles, se desarrolla y se necesitan 2 valores de volumen para 57 l/m²h, 80 l/m²h y 100 l/m²h

57 l/m²h

$$V = 57 \frac{L}{m^2h} * 0,022m^2 * \frac{1h}{60 \text{ min}} * \frac{1000ml}{1l}$$

$$V = 20,9m$$

80 l/m²h

$$V = 80 \frac{L}{m^2h} * 0,022m^2 * \frac{1h}{60 \text{ min}} * \frac{1000ml}{1l}$$

$$V = 29,3 \text{ mL}$$

100 l/m²h

$$V = 100 \frac{L}{m^2h} * 0,022m^2 * \frac{1h}{60 \text{ min}} * \frac{1000ml}{1l}$$

$$V = 36,6mL$$

Teniendo los datos del volumen que debe pasar a la membrana en un minuto para cada uno de los casos, se procede a iterar con los rpm de la bomba utilizada en el proceso hasta garantizar que en un minuto pasa cada uno de los datos de volumen calculados anteriormente.

Figura 18. Bomba utilizada



Fuente: *Elaboración propia*

En la figura 18., se muestra como por medio de agua limpia se determina los rpm necesarios en cada uno de los casos, por medio de ensayo y error.

Tabla 32. Aforación

Flujo L/m²h	volumen ml	rpm
250	91,6	33
57	20,9	7
80	29,3	10
100	36,6	13

Fuente: *Elaboración propia*

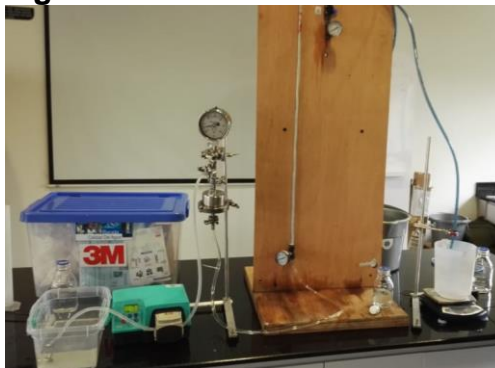
En la Tabla 32., se dan a conocer los rpm encontradas por medio de ensayo y error manipulando la bomba para obtener los flujos de agua calculados anteriormente, también se muestra un resumen de los datos obtenidos al desarrollar las ecuaciones con los diferentes flujos.

4.8 EXPERIMENTACIÓN

En la última etapa se realizan las pruebas, donde se cambia el flujo de 57, 80 y 100 L/m²h, teniendo en cuenta que el flujo mínimo de operación que da la simulación desarrollada.

Para desarrollar las pruebas se alimenta agua cruda tomada directamente de la PTAR, y con la ayuda de la bomba se empieza a realizar el proceso físico de separación.

Figura 19. Puesta en marcha



Fuente: *Elaboración propia*

La primera parte de la experimentación se desarrolla con el flujo recomendado por la simulación, se tiene en cuenta el tiempo y la masa para posteriormente definir el flujo.

Como fase preliminar se determina la turbidez de la muestra, parámetro que permite identificar el comportamiento de la calidad de agua a la salida de la membrana (ver figura 20).

Figura 20. Turbidez inicial



Fuente: Elaboración propia

La medida de turbidez inicial es relativamente alta comparada con la norma 2115 y la calidad de agua esperada por la empresa.

Tabla 33. Experimento 1 57 L/m²h

tiempo(min)	peso(g)	flux(lm ² /h)	peso (g)	Flux (lm ² /h)	Error %
5	71	38,727	75	40,909	5,63431198
10	166	51,818	171	51,654	0,31649234
15	260	51,272	261	50,223	2,04595101
20	354	51,272	357	52,363	2,12786706
25	450	52,363	452	51,818	1,04081126
30	553	56,181	558	57,818	2,91379648
35	648	51,818	649	49,636	4,21089197
40	740	50,181	742	50,727	1,08806122

Fuente: *Elaboración propia*

La Tabla 33., muestra el desarrollo del primer experimento con todas las aclaraciones desarrolladas durante el diseño del experimento.

El tiempo varía en intervalos de 5 minutos teniendo en cuenta que el tiempo máximo de operación debe ser 40 minutos, en cuanto al peso es tomado directamente de la acumulación del flujo de agua ultra filtrada y la presión es tomada directamente del indicador

Ecuación 3. Caudal ml/min

$$Q = \frac{\text{Peso (g)}}{T \text{ (min)}}$$

La Ecuación 3., permite identificar como se calcula la columna de caudal en las tablas de experimentación.

Ecuación 4. Conversión

$$Q_2 = Q * \frac{1L}{1000 \text{ ml}} * \frac{60min}{1h}$$

La Ecuación 4., permite realizar la conversión del caudal, con el fin de facilitar de cálculo en la determinación del flujo.

Ecuación 5. Calculo de flujo

$$F = Q_2/A$$

La Ecuación 5., permite calcular los datos de flujo en los diferentes intervalos de operación, donde A hace referencia al área de la membrana en m².

4.8.1 Variación de flujo 80 L/m²h

Tabla 34. Flujo inicial 2 80 L/m²h

ENSAYO					
tiempo(min)	peso(g)	flux(lm ² /h)	peso (g)	Flux (lm ² /h)	Error %
5	75	40,909	69	39,765	2,79645066
10	203	69,818	197	69,818	0
15	347	78,545	355	82,765	5,37271628
20	474	69,272	468	67,987	1,85500635
25	609	73,636	580	71,987	2,23939377
30	743	73,09	710	70,909	2,98399234
35	877	73,09	830	76,983	5,32631003
40	1010	72,545	950	71,323	1,68447171

Fuente: *Elaboración propia*

En la Tabla 34., se da a conocer en forma numérica el desarrollo del experimento en su segunda fase donde se toma como flux de entrada a la membrana 80 L/m²h.

4.8.2 Variación de flujo 100 L/m²h

**Tabla 35. Flujo inicial 3 100 L/m²h
ENSAYO**

tiempo(min)	peso(g)	flux(lm ² /h)	peso (g)	Flux (lm ² /h)	Error %
5	156	85,09	160	87,272	2,56434364
10	328	93,818	316	90,09	3,97365111
15	500	93,818	504	91,098	2,89923042
20	669	92,181	690	94,876	2,92359597
25	841	93,818	860	92,727	1,16288985
30	1016	95,454	1010	91,818	3,80916462
35	1185	92,181	1177	91,09	1,18354108
40	1278	92,181	1270	89,876	2,50051529

Fuente: *Elaboración propia*

En la Tabla 32., se da a conocer en forma numérica el desarrollo del experimento en su segunda fase donde se toma como flujo de entrada a la membrana 100 L/m²h.

En busca de dar mayor confiabilidad al proyecto se realiza una réplica en cada uno de los experimentos.

4.9 ANÁLISIS DE RESULTADOS EXPERIMENTO # 2

4.9.1 Flujo recomendado 57 L/m²h. El desarrollo de cada uno de los experimentos permite como primera medida identificar la cercanía de los diferentes datos. En un sistema UF convencional se pueden obtener datos con mínimas diferencias al replicar el experimento.

El comportamiento con un flujo de entrada de 57 L/m²h como lo recomienda la simulación desarrollada (ver anexo 1), logra el pico más alto de flujo de salida en un tiempo de 30 minutos, intervalo de tiempo en el cual la acumulación baja el rendimiento operativo de la membrana.

La réplica desarrollada en cada uno de los casos, se grafica con el fin de identificar el comportamiento de los datos y así obtener mayor veracidad de los datos obtenidos durante la prueba de ultrafiltración, allí se demuestra que en el caso replicado en un tiempo de 30 minutos se obtiene el valor de flujo más alto.

En este caso de flujo inicial de 57 L/m²h, se observa como la réplica y el experimento inicial tienen valores cercanos (ver tabla 30), lo que demuestra que la puesta en marcha del sistema se realizó de forma adecuada. Las condiciones de operación logran un aumento del flujo hasta el minuto 30, tiempo en el cual el caudal de salida de la membrana decrece debido a la acumulación de partículas extraídas del agua cruda.

En busca de obtener un valor acertado del proceso UF desarrollado se realiza un promedio entre el experimento y la réplica.

Tabla 36. Promedio flujo 57

TIEMPO (min)	Flux L/m ² h
5	39,8181818
10	52,0909091
15	50,1818182
20	51,8181818
25	52,0909091
30	57
35	50,7272727
40	50,4545455

Fuente: *Elaboración propia*

En la tabla 36., se encuentran consignados los valores promedio de flujo calculados en los diferentes tiempos de operación propuestos, con el fin de identificar el comportamiento de la UF con el dato de flujo inicial propuesto por la simulación.

El tiempo en el cual el flujo alcanza su máximo es en 30 minutos, tiene un comportamiento sin cambios bruscos en el flujo de salida (Grafico 3), se deduce que con este flujo la membrana no sufrirá taponamiento y aumento en su presión transmembrana durante el tiempo de operación.

El pico que se da en el cuarto intervalo de tiempo no es brusco y al final de la experimentación el flujo baja, pero tiende a mantenerse constante. Es importante aclarar que el agua de alimentación a la membrana en cada uno de los casos no tiene ningún tipo de pretratamiento.

Tabla 37. Comparación calidad

	CALIDAD (NTU)
EXPERIMENTO	0,37
RÉPLICA	0,4

Fuente: *Elaboración propia*

La Tabla 37., es un cuadro comparativo en el cual se muestra que el agua tratada cumple con las condiciones de operación para considerarse agua ultra filtrada, en ella se encuentra que en los experimentos realizados se parte de un valor de turbidez de 6,6 NTU y se logra agua con alto estándar de calidad en este caso En cuanto al valor que toma este parámetro en la experimentación se debe partir de la base, la cual tiene un valor máximo de 0,5 NTU.¹

También es importante resaltar que en este caso la masa de agua tratada es de 742 gramos, siendo este un valor por debajo de lo esperado según simulación, pero se considera que el procedimiento no tiene un 100% de efectividad, razón por la cual no se tiene el mínimo esperado de cantidad de agua tratada.

La simulación desarrollada con Liqui-cad, es de alta confiabilidad ya que basada en ella se han realizado proyectos exitosos en empresas como: Femsa, Veolia, Hidroeléctrica Ituango y Zenú Medellín.

La Ecuación 1., permite identificar el flujo de agua que llega a la membrana en un minuto, para este caso toma un valor de 20,9 ml/min, teniendo en cuenta que la operación dura 40 minutos y que se tiene un porcentaje de recuperación de 89,6% se tiene

Ecuación 6. Cálculo ideal de agua tratada

$$0,9 \frac{ml}{min} * 40min * 0,89 = 744,04 ml$$

En la Ecuación 6. Se calculó un valor de 744,04 ml en 40 minutos de operación, se deduce que el experimento se realizó adecuadamente al obtener un valor de 742 ml en 40 minutos con el flujo de operación recomendado.

4.9.2 Variación flujo 80 L/m²h. El aumento del flujo permite corroborar la información de la simulación, ya que se recomienda que el valor del flujo no sea alto, en un principio puede otorgar mayor cantidad de agua ultra filtrada en poco tiempo, pero disminuye la vida útil del proyecto al afectar la estructura interna de la membrana.

El resultado de aumentar el flujo inicial de la UF planteada es lograr el pico de acumulación en poco tiempo de operación. La primera experimentación realizada con este flujo muestra como el pico se logra en la mitad de tiempo que en el flujo inicial recomendado.

La réplica se realiza en cada uno de los casos, es importante aclarar, que para cada procedimiento se debe seguir la secuencia de experimentación ya mencionada,

donde el retro lavado y enjuague cobran un papel importante en la veracidad de los datos. La réplica y experimento inicial tienen un comportamiento similar en este caso, donde en cada uno de los experimentos, se identifica que el pico se mantiene constante en el mismo intervalo de tiempo, también se resalta como la caída del flujo no es significativa pero la acumulación en la membrana se hace en muy corto tiempo.

Teniendo en cuenta la cercanía de los datos, al igual que en la experimentación con el flujo anterior se toman valores promedio del flujo obtenido a la salida de la membrana en los diferentes intervalos de tiempo.

Tabla 38. Promedio flujo 80

TIEMPO (min)	Flux L/m ² h
5	39,2727273
10	69,8181818
15	82,3636364
20	65,4545455
25	67,3636364
30	72
35	69,2727273
40	69

Fuente: *Elaboración propia.*

Según los datos obtenidos en la Tabla 38., se desarrolla la gráfica que representa el comportamiento del sistema UF aumentando el flujo inicial de operación. Se identifica como el flujo logra su punto más alto en un tiempo de 15 minutos, ese punto permite mostrar, que en ese tiempo la acumulación en la membrana y la presión transmembrana logran un valor muy alto que afecta el flujo de agua tratada, por consiguiente esta operación puede ser tenida en cuenta para la planta en Sopó, pero debe hacerse un control y mantenimiento a la membrana con CIP y CEB en menores intervalos de tiempo, aumentando el costo y disminuyendo la viabilidad financiera del proyecto.

Tabla 39. Calidad flujo 80

	CALIDAD (NTU)
EXPERIMENTO	0,4
RÉPLICA	0,4

Fuente: *Elaboración propia*

La calidad de agua obtenida en el segundo caso evaluada al finalizar el proceso y medida por medio de turbidez (NTU), cumple con el estándar de agua anteriormente mencionado y es aceptada por el estándar de calidad de la empresa cliente.

La Tabla 39., muestra que el valor obtenido en la réplica y en el experimento son constantes, debido a las buenas condiciones de operación que se tuvieron en cuenta al realizar cada uno de los experimentos.

En cuanto a la cantidad de agua tratada en este experimento, se calcula replicando la metodología del experimento anterior, donde se tiene un flujo volumétrico inicial y por medio de la eficiencia del proceso se determina la cantidad de agua que debe ser tratada.

$$29,3 \frac{ml}{min} * 40min * 0,89 = 1043,08 ml$$

La diferencia en el caso de 80 L/m²h es mayor comparada con el experimento anterior, donde toma un valor de 1010 ml, y la diferencia es de 33 ml con lo que se espera de forma ideal (1043,08), puede considerarse que la eficiencia de la membrana se ve afectada desde el tercer intervalo de tiempo, razón por la cual el flujo pasados 40 minutos es menor al esperado.

4.9.3 Variación flujo 100 L/m²h. En este experimento se aumenta aún más el flujo inicial de agua, esto permite identificar hasta qué punto es viable llevar el caudal de entrada sin que afecte de manera considerable la estructura interna de la membrana.

La experimentación inicial desarrollada bajo un flujo de 100 muestra como genera inestabilidad en el proceso UF, teniendo en cuenta que el pico se genera en un tiempo de 20 minutos, pero los cambios son bruscos comparados con los resultados anteriores, razón por la cual se infiere que la presión en el interior de la membrana afecta el flujo a la salida, decreciendo en los últimos intervalos de tiempo.

La réplica desarrollada con un flujo de 100 L/m²h es la que presenta mayor distancia según su grafica inicial, sin embargo, el comportamiento en los dos casos permite demostrar la inestabilidad que genera a un sistema de ultrafiltración trabajar con flujos de agua muy elevados.

En los dos casos se identifica un pico y a partir de ahí hay estabilidad en los diferentes intervalos de tiempo, en este caso el tiempo donde se genera el pico está

ente los 15 y 20 minutos, siendo un tiempo menor comparado con el obtenido al utilizar el flujo mínimo de operación dado por la simulación.

Tabla 40. Promedio flujo 100

TIEMPO (min)	Flux L/m2h
5	86,1818182
10	89,4545455
15	98,1818182
20	105,272727
25	84,8181818
30	88,6363636
35	91,6363636
40	85,0909091

Fuente: *Elaboración propia*

Se desarrolla promedio para este caso (ver Tabla 40.), con el fin de dar un posible comportamiento del flujo de salida al desarrollar la experimentación con un valor de caudal inicial alto

En este proceso se muestra la inestabilidad de este experimento tomando como flujo inicial 100 L/m²h. En este caso la acumulación en la membrana afecta el comportamiento en la salida, esto se da debido a la excesiva inyección de agua y el área de membrana a disposición no está en capacidad de tratar ese flujo de volumen.

Tabla 41. Calidad flujo 100

	CALIDAD (NTU)
EXPERIMENTO	0,36
RÉPLICA	0,36

Fuente: *Elaboración propia*

El resultado obtenido en cuanto a calidad mejora comparado con los experimentos anteriores, lo que demuestra que el aumento del flujo en forma considerable no afecta la calidad de agua de salida, en el momento que la calidad de agua no sea la esperada, se puede inferir que hay problemas en la estructura de la membrana.

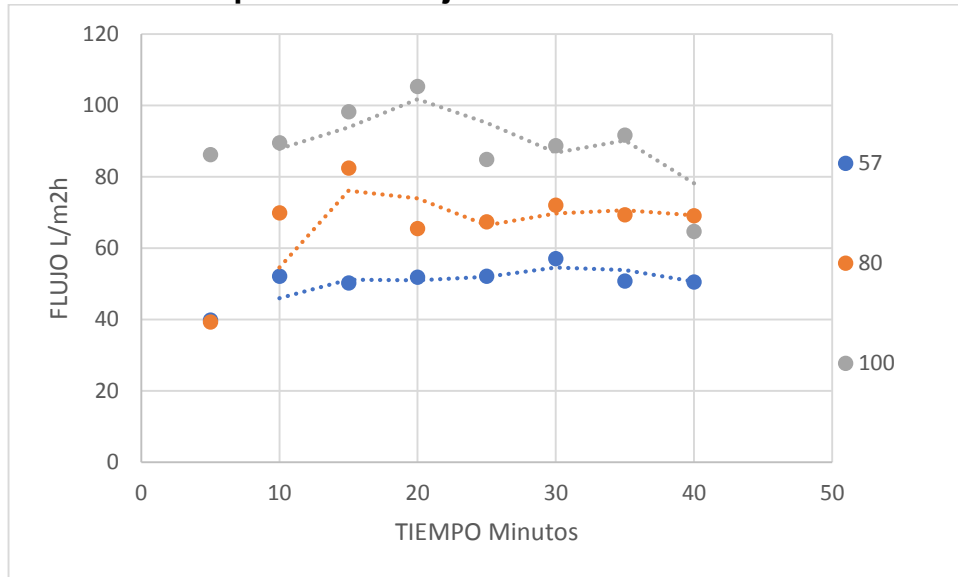
$$36,6 \frac{ml}{min} * 40min * 0,89 = 1302,96 ml$$

En este caso tampoco se logra con el ideal de agua esperada y la diferencia es mayor comparada con el caso inmediatamente anterior, siendo esta de 32 ml,

aclarando así que aumentar mucho el flujo de agua inicial afecta de manera directa el flujo de salida y por ende la cantidad de agua tratada.

4.10 ANÁLISIS FINAL EXPERIMENTO 2

Gráfico 3. Comparación 3 flujos



Fuente: *Elaboración propia.*

El Gráfico 3., permite comparar los picos obtenidos en cada uno de los experimentos, identificando que el modo de operación propuesto por la simulación de 57 L/m²h es el más indicado si lo que se quiere es cuidar la estructura de la membrana, evitando la acumulación y alargando su vida útil ya que en este flujo se obtiene flux más alto por lo que hay mayor cantidad de agua filtrada y valores cercanos en todos los intervalos. El gráfico permite corroborar la información analizada, donde la línea que presenta un comportamiento menos brusco es a la que le corresponde el flujo inicial recomendado por la simulación.

En caso de seleccionar flujos de operación mayor al recomendado, es posible que en un principio se logre tratar mayor cantidad de agua, pero el factor de ensuciamiento que se da en la estructura interna de la membrana, le genera muchas complicaciones en tratamientos futuros, donde la principal consecuencia es fractura de membrana, la cual solo tiene como solución utilizar un módulo UF nuevo generando un aumento significativo en los costos del proyecto.

El proveedor de membrana 3M Colombia recomienda seguir las indicaciones de Liqui-Cad, para así mantener la garantía del producto, los experimentos desarrollados muestran que al aumentar demasiado el flujo inicial la acumulación se logra en muy poco tiempo y trabajar con una membrana saturada genera fractura en su estructura de fibra.

5. PROPUESTA ESCALA INDUSTRIAL

El desarrollo de pruebas piloto en la empresa del sector alimenticio permite desarrollar una propuesta a escala industrial, esta ayuda a la empresa para tener una visión más grande de lo que se puede desarrollar al utilizar sistemas UF dentro de su proceso industrial.

En busca de desarrollar una propuesta completa, se realiza un paso a paso en el cual la empresa puede observar las diferentes consideraciones y aspectos que se deben tener en cuenta para llevar a cabo un proceso UF en escala industrial.

El paso de escala piloto a industrial se desarrolla con el fin de realizar un acercamiento a la empresa cliente de lo que puede llegar a necesitar si lo que se quiere es utilizar un proceso de ultrafiltración en la corriente de salida de su PTAR.

Para realizar este supuesto se toma como base el cumplimiento del caudal de agua tratada de 120 m³/h. el caudal de agua manejado por la planta de Sopó requiere un amplio número de membranas, en el anexo 1. Se muestra una de las corridas realizadas en el simulador según las condiciones del agua a tratar, allí se identificó que el número de membranas era elevado y que se podía recuperar un 90% del caudal de agua tratada.

5.1 INSTALACIÓN

La instalación de un juego de membranas UF puede darse tanto en planta como en campo, teniendo en cuenta las implicaciones de cada uno

5.1.1 Planta. El desarrollo de un sistema UF industrial en planta se debe verificar y diagnosticar el proceso al cual será incluida la ultrafiltración como etapa, esto con el fin de evitar posibles complicaciones que el sistema puede tener en caso de verse sometido a altas vibraciones o fuertes cambios de temperatura, dejando como principal consecuencia fractura en las estructuras internas de la membrana.¹

El transporte de la membrana hasta la planta tiene suma importancia. Es frecuente que durante este proceso la membrana sufra daños, por ende, es importante realizar revisiones previas y comunicarse con el proveedor en caso de anomalías.^{1,2}

Según la empresa proveedora de membranas se requiere una membrana para lograr manejar un caudal de agua de 9m³.²

Ecuación 7. Número de membranas

$$N_{membranas} = \frac{Q \text{ a tratar}}{Q \text{ 1 membrana}}$$

$$N_{membranas} = \frac{120m^3/h}{9m^3/h}$$

$$N \text{ membranas} = 14 \text{ membranas}$$

La ecuación 7 permite corroborar que la información suministrada por la simulación es correcta en cuanto el caudal de agua a tratar, es importante tener en cuenta que en todo sistema de ultrafiltración se generan pérdidas de allí que la eficiencia del proceso no es del 100%.

La planta en la cual se instala el sistema (sector alimenticio), debe contar con personal capacitado para la operación del sistema. Esto garantiza a la empresa que la vida útil de las membranas sea la esperada y evita cambios eventuales en el sistema de membranas. Las consideraciones que se tienen en cuenta para el desarrollo del piloto son las mismas a nivel industrial, ya que no se requiere pre-tratamiento pero de igual forma se requiere la presencia de micro filtros que separan las partículas de mayor tamaño y hacen más fácil el trabajo de las membranas.^{1,2}

[1] MEMBRANA GmbH. Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.

[2] 3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016

Figura 21. Sistema de membranas



Fuente: *3M MEMBRANA BUSINESS UNIT: Latam capacitación de Liqui-Flux integradores de sistemas, 2016.*

En la Figura 21., se ve un sistema de membranas UF, las cuales se ensamblan con un puerto de alimentación axial, dependiendo el número de membranas utilizadas se garantiza el aumento en diferentes cualidades que otorga un sistema de ultrafiltración convencional; en cuanto a calidad de agua es máxima por ello se propone a la empresa del sector alimenticio que en su planta ubicada en Sopó, implementen un sistema de membranas con el fin de lograr la potabilización de su corriente de agua residual industrial.

5.2 RECOMENDACIONES DE PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA

Para poner en marcha un sistema UF con membranas se deben desarrollar unos pasos de vital importancia en busca de garantizar el funcionamiento eficiente del sistema.

- Realizar un enjuague con agua limpia y de bajo contenido mineral

- Las válvulas de que alimentan la membrana deben llenar lentamente el sistema UF
- Las válvulas de concentrado deben permanecer cerradas.
- Realizar un CEB

5.3 RECOMENDACIONES

La utilización de un sistema de membranas tiene una inversión inicial elevada (ver tabla 59), razón por la cual es importante garantizar que el sistema cumpla con su vida útil esperada. Las siguientes recomendaciones se deben tener en cuenta para el desarrollo industrial de una UF.

- No superar los límites de temperatura y presión (ver tabla 4)
- La presión transmembrana tiene un límite máximo 0.8 (11.6psi)
- Evitar golpes de ariete que generen desgaste estructural.
- Usar micro filtración para garantizar que no entren al sistema sustancias como arena o viruta
- Retrolavar las membranas con frecuencia para diluir sustancias contaminantes.

5.4 OPERACIÓN NORMAL

Figura 22. Conectores



Fuente: MEMBRANA GmbH. *Manual Técnico: Liqui-Flux® Serie-W. Módulos de ultrafiltración para el tratamiento de aguas, 2015.*

En la figura 22., se dan a conocer las conexiones básicas de una membrana que son:

- Conector de alimentación
- Conector de concentrado
- Conector de filtrado

Para la operación normal de estas membranas se propone:

- Realizar la alimentación de agua cruda a la membrana por el puerto 1 (ver figura 14) durante 15 minutos.
- Realizar retro lavados en un rango de 40 a 60 segundos, se deben garantizar que los retro lavados utilicen la salida superior 2 e inferior 1 (ver figura 14)
- Revisar si se requiere o no CEB.

5.5 LIMPIEZA ESPECIAL (CIP)

El flujo de filtrado debe cumplir un rendimiento esperado para que el proceso de ultrafiltración este cumpliendo con las expectativas y sea un proceso rentable, Si el flujo de filtrado está muy inferior al esperado se debe realizar una limpieza al módulo por medio de químicos, en donde según el flujo de agua y lo contaminado de la membrana se agrega la cantidad de coagulante para lograr eliminar los residuos y contaminantes que no permitan el buen funcionamiento de la membrana.

Para esta limpieza se debe realizar osmosis inversa con el permeado o agua lo suficientemente blanda ya que esta requiere concentraciones químicas más bajas y de esta manera se reduce el consumo de coagulante. Es muy importante durante la limpieza evitar cualquier precipitación que pueda taponar la superficie de la membrana, y además se debe tener en cuenta los límites de operación de la membrana para evitar algún imprevisto.

5.5.1 Lavado con agua. Este paso consiste en vaciar el sistema y llenar un tanque que será exclusivamente para CIP y posteriormente cargar de nuevo el sistema con agua dejando circular el agua del lado del lumen aproximadamente 10 a 15 minutos a 60-80 l/m². Cumplido el tiempo filtrar a 20-30 l/m² y vaciar el sistema.

Limpieza alcalina: Este paso consiste en preparar una solución alcalina al 0.1-1%, (se recomienda NaOH) en un recipiente designado para CIP. LA dosis requerida de químico debe ser seleccionada según el volumen de llenado de la membrana y de tuberías. LA solución se debe dejar circular aproximadamente 30-60 minutos a 60-80 l/m²/h sin filtrar y se aumentará la temperatura lentamente hasta 40°C.

Lavado Intermedio: En este paso se debe vaciar el sistema y realizar un lavado de la misma manera que en el lavado con agua y posteriormente enjuagar a 30-40°C.

5.5.2 Limpieza ácida. Este paso consiste en neutralizar la solución alcalina y remover el sarro, usando una solución acida al 0.1-1%, como por ejemplo ácido hidroclicórico o ácido cítrico, estos ácidos gracias a su compleja actividad suelen ser más efectivos que los ácidos inorgánicos. Posteriormente se debe dejar circular la solución entre 30-60 minutos a 60-80 l/m²/h sin filtrar y aumentar la temperatura lentamente hasta 40°C.

Lavado con agua: En este paso se realiza nuevamente un lavado con agua, así como en el paso 1 hasta que el agua enjuagada tenga un valor de pH neutro. Al realizar estos 5 pasos el sistema quedara listo para para el modo regular de filtración. De no ser así se deben ajustar los intervalos de limpieza o repetir pasos.

5.6 PRUEBA DE INTEGRIDAD

Para realizar la prueba de integridad se recomienda realizar 8 pasos

- Retire de servicio todo el sistema. Dejando todos los módulos llenos de agua.
- Cierre todas las válvulas menos la del concentrado, ya que abrir las válvulas del concentrado permite drenar el agua y disminuir la presión del sistema.
- Aplique una presión entre 0.4-0.5 bar del costado del filtrado por medio de aire limpio.
- Espere a que el aire presurizado haya hecho pasar el agua del filtrado al concentrado.
- Espere por un tiempo de 1 a 2 minutos a que la presión se estabilice.
- Realice una revisión del visor de salida para comprobar si hay muchas burbujas de aire. De ser así, el módulo podría tener fibras dañadas.
- Libere la presión del sistema y retire los módulos dañados.
- Instale el modulo reparado o nuevo y desaire el sistema para el arranque.

5.7 REGISTRO DE DATOS DE LAS CONDICIONES OPERATIVAS

Se debe documentar varios parámetros para supervisar, analizar retroactivamente y optimizar la operación del sistema. Todos los parámetros deben estar registrado al menos una vez por minuto durante el retro lavado y la limpieza con tratamiento química, para determinar los picos de presión. Se debe comprobar el cumplimiento de límites de presión máximos de acuerdo a las fichas de datos e instalar indicadores de presión análogos e indicadores de arrastre del lado de la alimentación y el filtrado de cada bloque.

Toda la información debidamente documentada las condiciones operativas permitirá un mayor control y conocimiento y comprobante ante cualquier garantía.

5.8 PROCEDIMIENTOS DE PARADA DEL SISTEMA

Para la parada en un sistema a nivel industrial se deben tomar ciertas recomendaciones según el tiempo en el que el sistema vaya a estar detenido. Se debe evitar o minimizar el crecimiento de bacterias durante la inactividad del sistema.

- Parada por menos de 24 horas:
Antes de detener el sistema se debe realizar un retro lavado o filtrado de mínimo 60 segundos a 250 l/m²/h para evitar acumulaciones posteriormente.
- Parada por más de 24 horas y menos de 7 días
Filtrar una vez al día durante 10 minutos como mínimo 40-50 l/m²/h y luego realizar un retro lavado con filtro y agregando 1 ppm de cloro activo de (NaOCl).
- Parada por más de 7 días
Se debe remover las capas de materia orgánica e inorgánica acumuladas en las membranas y realizar un retro lavado con químicos. El pH de cada membrana debe estar en un rango de 10.5 y 11. Se debe tener cuidado con los ensuciamientos y acumulaciones que puedan presentar los módulos y antes de su uso nuevamente realizar una revisión a todo el sistema.

5.9 DIAGRAMA

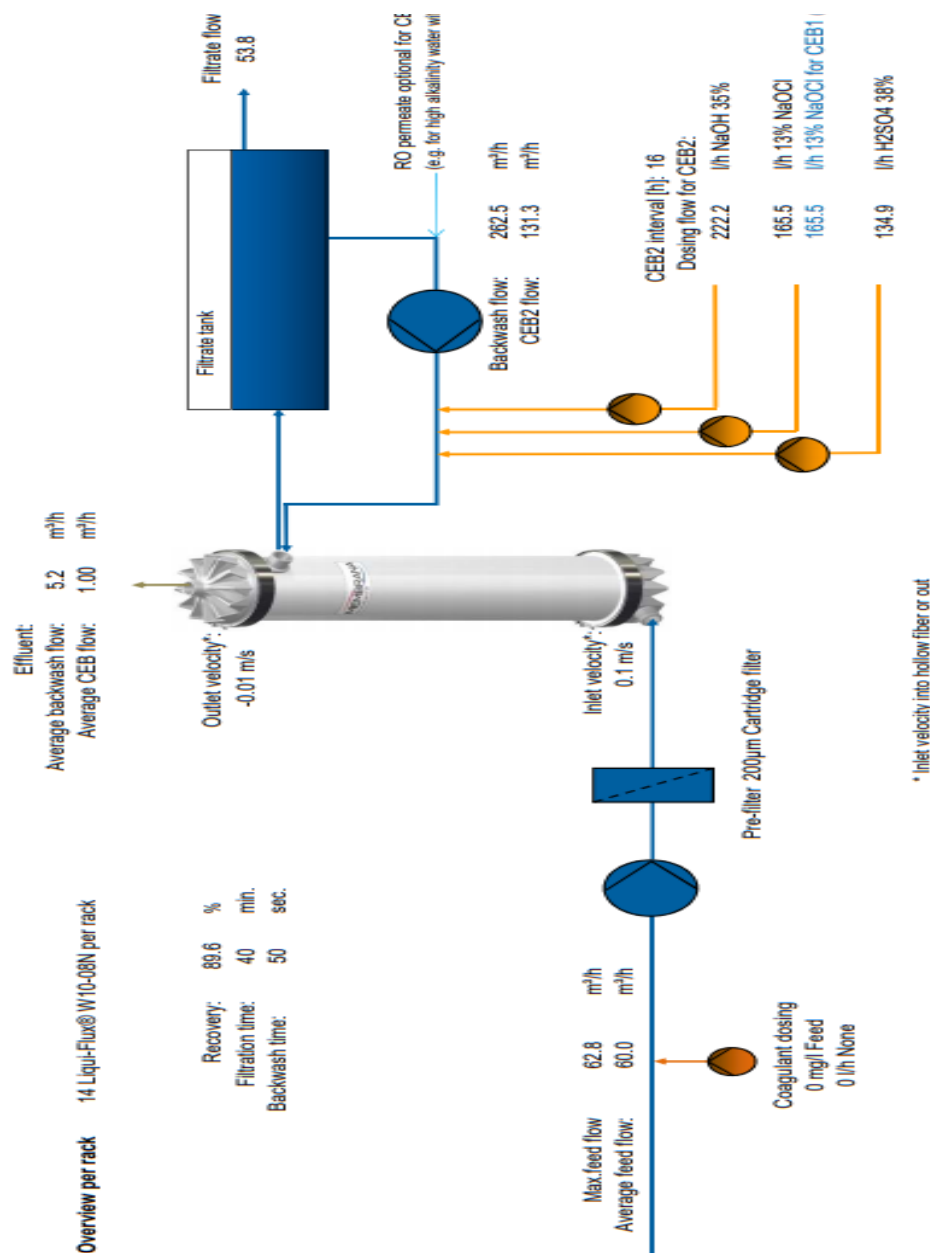
Con la empresa financiadora de Waterning se propone un sistema con 14 membranas el cual permite tratar un flujo de agua de 65.993 m³/mes que producen en la planta y obtener un agua de alta calidad que pueda ser recirculada a los procesos.

El diagrama para el sistema fue diseñado con ayuda de ingenieros y diseñadores de la empresa, los cuales consideran esta sería la opción más viable para tratar el alto flujo de agua que se maneja en sopo y cumplir la resolución 2115.

En el diagrama 6 se muestra el esquema general de membranas y a la entrada cartuchos de micro filtración, válvulas para abrir y cerrar los pasos de fluido, bombas para alcanzar los flujos necesarios y lograr la mayor eficiencia posible del proceso. Además, cuenta con corrientes de agua filtrada, para limpiezas y para eliminación de residuos.

Las diferentes condiciones de operación que se proponen fueron demostradas en el desarrollo experimental, también es importante resaltar como en la simulación desarrollada se propone diferentes sistemas de mantenimiento con producto.

Diagrama 5. Condiciones industriales



Fuente: *Liqui-cad simulation.*

5.10 CONDICIONES DE OPERACIÓN SEGÚN RESULTADOS OBTENIDOS

El equipo de trabajo al realizar la experimentación, ofrece a la empresa del sector alimenticio diferentes condiciones de operación, que facilitan el tratamiento de su

corriente de agua residual industrial, para ello se plantea la posibilidad de seguir recomendaciones otorgadas por la simulación desarrollada (ver anexo 1).

El Diagrama 6., da a conocer diferentes parámetros obtenidos durante la simulación, y estudiados en la etapa experimental, por ende, se recomienda el uso de un flujo de alimentación a la membrana de 57 L/m²h, en el cual se garantiza el buen funcionamiento de la membrana y además se cuida la estructura interna de la misma.

En cuanto a calidad de agua en la entrada es importante resaltar que el uso de coagulante facilita disminuir la carga biológica del agua, pero genera la rápida acumulación en la membrana.

Tabla 42. Agua esperada

PARAMETRO	UNIDADES	AGUA CRUDA	AGUA TRATADA
Temperatura	°C	21,3-25,20	21,3-25,20
DBO	mg/L		38 <5
TSS	mg/L		37 <5
NTK	mg/L	n/a	n/a
NH3-N	mg/L		14,98 <5
NT	mg/L		19,7 <15
TURBIDEZ	NTU		6,6 0,3

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 42., se muestra una comparación entre el agua que sale de la PTAR y la que sale de un equipo UF, donde los principales parámetros son medidos y comparados según resultados obtenidos, en él se evidencia como después de una UF a escala piloto se obtiene agua con importantes estándares de calidad y cumplimiento de la calidad de agua esperada por la empresa.

6. PROPUESTA FINANCIERA

6.1 VARIABLES

La última parte del proyecto tiene como fin demostrar la viabilidad financiera del sistema UF propuesto a lo largo del mismo, para ello se determinan diferentes indicadores económicos que demuestran si es factible llevar a cabo un proyecto; la relación beneficio/costo juega un papel importante en este proyecto, ya que este se considera el indicador más importante dentro del proyecto.

Para el estudio financiero de la propuesta se tendrá en cuenta los gastos, costos y las inversiones que deberá realizar la empresa para obtener el sistema completo, la mano de obra necesaria, los costos de mantenimiento y una comparación de la propuesta frente al sistema con el que cuentan actualmente.

6.1.1 Inversión. Para la inversión la empresa debe tener en cuenta los equipos necesarios que se encuentran en el diagrama P&ID, la mano de obra para el montaje del sistema a escala industrial, capacitaciones que puedan requerir algunos empleados.

6.1.2 Costos. Los costos en los cuales incurrirá la empresa principalmente son materias primas de coagulantes, Mano de obra, depreciación de maquinaria y equipos los cuales se calculan basándose en un buen uso del sistema y recomendaciones para lograr las mayores eficiencias.

6.1.3 Gastos. Los gastos principalmente son Para el mantenimiento en donde deben tener en cuenta el buen uso de todos los equipos presentes en el sistema para los cuales se requiere un mantenimiento de maquinaria, capacitaciones. Pueden existir factores externos que puedan incurrir en gastos mayores los cuales se mencionan, pero si se sigue las recomendaciones y se da un buen uso del sistema no debería de ocurrir.

6.1.4 Análisis. El sistema que se propone tiene una inversión inicial alta, pero a comparación del método convencional actual tendrá una mejora en la eficiencia y en la cantidad de agua que pueda tratar lo que traerá una reducción en el costo de agua y una disminución de mantenimiento de equipos.

6.2 VARIABLES ECONÓMICAS DEL PROCESO

El desarrollo del proyecto de ultrafiltración por membrana, permite identificar algunas variables que juegan un papel de suma importancia para demostrar la viabilidad financiera del proyecto, este además de tener un aspecto social, económicamente puede convertirse en una importante oportunidad. Algunas variables económicas del proceso son:

6.2.1 Costo de agua. El agua es la principal materia prima de este proyecto, razón por la cual debe ser tomada como variable respuesta principal si lo que se quiere es demostrar que es viable realizar un proceso UF, dentro de la planta del sector alimenticio ubicada en Sopó.

Teniendo en cuenta que la cantidad de agua que se vierte actualmente por la empresa es alta, el uso de una etapa que garantice altos estándares de calidad, permite a la empresa reutilizar esta corriente que actualmente es desechada, por lo tanto, el costo de agua que generan los procesos internos de la empresa se verán beneficiados con el uso de tecnología UF, que garantiza una corriente de recirculado.

Según el diagnóstico desarrollado en el primer capítulo la cantidad de agua que debe ser tratada a la salida de la PTAR, tiene un alto costo según el precio por m³ actual en el sector de Sopó

6.2.2 Costos Iniciales. Para realizar un proceso de ultrafiltración a escala industrial se requiere una inversión inicial elevada, esto comparado con procesos convencionales utilizados para el tratamiento de agua como coagulación-floculación o el uso de clarificadores, la gran diferencia que destaca un proceso UF es el estándar de calidad que se obtiene y los bajos costos de operación, ya que es un proceso de separación físico.

Es importante considerar el costo de los equipos en la inversión inicial, estos pueden variar de forma significativa dependiendo del tipo de agua a tratar y el caudal que maneje esa corriente; en el caso de la empresa estudiada se recomienda un sistema de 14 membranas el cual garantiza buena calidad de agua y también trata el caudal de agua desperdiciado por la empresa. El uso de 14 membranas UF acarrearán grandes costos con equipos adicionales como tubería, bombas y carcasas de micro filtración por cada membrana, beneficiando así la vida útil del equipo principal en un sistema de ultrafiltración.

6.2.3 Mantenimiento. Un sistema de ultrafiltración industrial ve en el costo del mantenimiento de sus equipos la verdadera utilidad del proyecto, ya que este es encargado de alargar la vida útil de los diferentes equipos utilizados en esta tecnología de filtración; sin duda la membrana UF 3M es el equipo de mayor relevancia y costo del proyecto.

En capítulos anteriores (ver capítulo 2 y 3) se estipulan técnicas de limpieza de la membrana que deben ser implementadas si no se quiere perder la elevada inversión que se hace en cada una de ellas, también es importante resaltar que hay procedimientos que requieren productos químicos para el mantenimiento preventivo de la membrana, estos pueden alterar la inversión inicial haciéndola mayor, pero alargando considerablemente la vida útil del proyecto.

La empresa puede encargar a un operario para que este se encargue de realizar y supervisar los mantenimiento que debe tener el sistema, los cuales van directamente proporcional al uso del sistema. Para este caso se deben hacer las limpiezas con y sin producto químico, los procedimientos de parada con tiempos establecidos y mantenimiento a los equipos y la membrana cada 4 meses.

6.2.4 Operación. La operación en un sistema UF tiene costos representativos como en la mayoría de procesos, en este caso no son tan elevados teniendo en cuenta que la mayor parte del proceso la hace el equipo (membrana UF), sin embargo, es importante que el operario encargado tenga conocimiento del proceso y del tipo de operación que se realiza (ver capítulo 2), de lo contrario puede ocasionar problemas que posteriormente pueden llevar a consecuencias graves como la fractura estructural de la membrana.

Otros costos importantes pueden ser a nivel energético, donde un proceso de operación Dead-End, garantiza mayor caudal y calidad de agua tratada, pero su requerimiento energético es mucho mayor, esto debido a que se requiere una bomba de mayor potencia que garantice el paso del caudal de entrada y corriente de recirculado.

6.2.5 Problemas Frecuentes. En un sistema UF al igual que en los diferentes procesos se tienen imprevistos que se transmiten a los costos y gastos del proyecto, fácilmente la fractura de la membrana debido a su mal uso genera que la empresa proveedora no responda por garantía, por lo cual el proyecto tardará demasiado tiempo para ser viable económicamente.

Otro problema frecuente en esta industria es el uso inadecuado de productos químicos en la membrana, obligando a la empresa a utilizar una membrana UF nueva debido a que su estructura interna fue modificad y dañada; económicamente hablando el equipo de mayor costo en el proyecto es el más delicado y con el que se debe tener mayor precaución.

6.3 ESTUDIO DE COSTOS DE EQUIPOS

Tabla 43. Costo de equipos

Item	Descripción	Proveedor	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total	Precio Total
1	Tanque agua cruda de 250 L		8	\$ 80.000	\$ 80.000	\$ 640.000
2	Bomba de booster	Grundfos	14	\$ 1.607.112	\$ 21.420.000	\$ 22.499.568
3	Carcasa de microfiltración	3M	14	\$ 630.240	\$ 8.400.000	\$ 8.823.360
4	Cartuchos de microfiltración	3M	14	\$ 315.120	\$ 4.200.000	\$ 4.411.680
5	Membrana Uf	3M	14	\$ 7.352.800	\$ 98.000.000	\$ 102.939.200
6	Tanque agua tratada	Colempaques	1	\$ 1.575.600	\$ 1.500.000	\$ 1.575.600
7	Tanque CIP 60L	Prominent	2	\$ 535.704	\$ 1.020.000	\$ 1.071.408
					Total	\$141.960.816

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 43., se da a conocer a manera de cotización el costo de los equipos necesarios para un proceso de ultrafiltración convencional actual en Colombia, estos equipos pueden ser conseguidos por proveedores nacionales, o como en el caso de la bomba (Grundfos) se puede recurrir a empresas multinacionales con representación en el país.

A nivel de costos es importante considerar al principal proveedor de la empresa financiadora (3M), el cual ayuda a este proyecto a conseguir la materia prima más importante en una UF (membrana UF), este dispositivo no es de fácil acceso en el mercado nacional, sin embargo, la multinacional 3M ofrece membranas de ultrafiltración (Liqui-Flux) y nanofiltración (Liqui-Cell), de allí que su costo es elevado comparado con otros equipos del proceso, teniendo en cuenta que de este depende la viabilidad técnica del proceso.

Tabla 44. Costos de instrumentación

	ca nt	1	2	3	4	
1	Indicador de presión	14	\$ 120.000	\$ 126.048	\$1.680.0 00	\$1.764. 672
2	Transmisor indicador de temperatura	1				
3	Indicador de temperatura	4	\$ 150.000	\$ 157.560	\$ 600.000	\$ 630.240
4	Transmisor indicador de flujo	1				
5	Skid	1	\$1.000.0 00	\$1.050.4 00	\$1.000.0 00	\$1.050. 400
6	Interconexión hidráulica	1				
7	Interconexión eléctrica	1				
8	Tablero Eléctrico	1	\$ 500.000	\$ 525.200	\$ 500.000	\$ 525.200
					Total	\$3.970. 512

Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de procesos industriales es importante tener en cuenta los costos que se generan debido a la instrumentación necesaria, en el diagrama P&ID propuesto (ver diagrama 6), se evidencia la necesidad de diferentes indicadores que garanticen el buen funcionamiento del sistema, en el caso de los indicadores de presión permiten tener control sobre la presión transmembrana y a su vez garantizando que no se fracture la membrana y que económicamente no sea viable el sistema UF.

En la Tabla 44., también se tiene en cuenta el costo de un Skid, este representa las pruebas desarrolladas a escala piloto y lo que garantiza es que previo a desarrollar el montaje del proceso, se tenga claridad de los resultados a obtener en las diferentes etapas donde pueda ser utilizado un proceso de ultrafiltración a escala industrial.

Tabla 45. Costos hidráulicos

Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo Total
Tubo 2 inch PVC RDE 21		\$	\$
	200	26.667	5.333.400
Accesorios PVC sch 80		\$	\$
	100	33.000	3.300.000
Válvula bola manual		\$	\$
	200	114.200	\$22.840.000
cheque 2 inch PVC		\$	\$
	14	432.400	6.053.600
Consumibles		\$	\$
	14	141.800	1.985.200
			\$39.512.200

Fuente: Elaboración propia

Un proceso UF es netamente físico e hidráulico, por ende, el costo de equipos y demás implementos necesarios para el manejo del agua tienen un costo representativo, si lo que se quiere es evaluar todos los costos y lo necesario para la inversión inicial.

Es importante resaltar que según la Tabla 45., un sistema UF requiere un elevado número de válvulas y a nivel de costos hacen la diferencia en este aspecto, la empresa proveedora de la membrana exige el uso de estas válvulas ya que no solo importan en el proceso físico, sino que también tienen gran funcionalidad para el mantenimiento y puesta en marcha del sistema.

Tabla 46. Resumen costos de equipos

costos de equipos	\$
	141.690.816
Costos Hidraulicos	\$
	39.512.200
Costos de Instrumentación	\$
	3.970.512
Total	\$
	185.443.528

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 46., se muestra de forma resumida el costo en cuanto a equipos que maneja un sistema UF convencional a escala industrial con 14 membranas, se identifica en esta tabla que en cuanto a equipos la inversión inicial es elevada, pero

se resalta que a nivel de operación y mantenimiento el proyecto no tiene costos elevados, razón por la cual solo se requiere una fuerte inyección económica inicial.

6.4 COSTOS DE PERSONAL

Para desarrollar un proyecto de ultrafiltración a escala industrial se debe contar con diferentes profesionales que garanticen el excelente montaje y puesta en marcha del piloto, para ello es importante resaltar que el tiempo es una variable determinante, debido a que por medio de ella se calcula el costo de personal en cada una de las áreas del proyecto.

Para el montaje del sistema a nivel industrial es indispensable la participación y el trabajo de personal especializado en este tipo de procesos. Por lo menos un ingeniero que supervise de manera detallada cada operación para evitar fallos y un supervisor mecánico que este pendiente de los operarios y el ensamble de todos los equipos y operaciones.

Tabla 47. Personal para conexión

Personal	cant.	Tiempo(días)	Salario	FP	Valor HH	Total
Supervisor Mecánico	1	15	\$ 2.500.000	1,53	\$ 15.938	\$ 2.151.563
Tubero	1	15	\$ 2.000.000	1,53	\$ 12.750	\$ 1.721.250
Ayudante Técnico	1	15	\$ 1.500.000	1,53	\$ 9.563	\$ 1.290.938
					Total	\$ 5.163.750

Fuente: Elaboración propia

Los costos hidráulicos (ver tabla 45) requieren personal capacitado para su conexión, según la experiencia de la empresa financiadora en sistemas UF se requiere:

- **Supervisor:** encargado de garantizar un trabajo de alta calidad y con ningún problema relacionado con la parte hidráulica
- **Tubero:** operario capacitado y encargado de ensamblaje de equipos e instrumentos relacionados con la sección hidráulica
- **Ayudante:** subordinado del tubero y encargado de colaborar con diferentes funciones necesarias para el ensamblado de cada uno de los instrumentos.

La Tabla 47., da a conocer el costo de cada uno de los cargos anteriormente mencionados, según su nómina es posible calcular el costo por hora de cada uno, y así realizar un análisis económico del costo que genera al proyecto la instalación que permite el manejo de agua.

Tabla 48. Costo ingenieril

Item	Descripción	Proveedor	Cant.	Costo Unitario	Costo Total
1	Ingeniería	DPW	100	\$ 25.000	\$ 2.500.000
2	Montaje	DPW	1	\$ 1.292.188	\$ 12.921.888
3	Arranque	DPW	1	\$ 3.086.000	\$ 3.086.000
				Total	\$ 6.878.188

Fuente: Elaboración propia

La ingeniería necesaria para un sistema de ultrafiltración se relaciona con la parte de diagnóstico planeación y ejecución, los ingenieros encargados en Dp watering toman hasta 100 horas para desarrollar un proyecto a escala industrial y en la Tabla 19., se muestra el valor económico de una hora de trabajo por ingeniero, en cuanto al montaje y puesta en marcha la empresa financiadora tiene presupuestado un valor fijo (ver tabla 48).

Tabla 49. Costos operacionales

<i>Descripción</i>	<i>cant.</i>	<i>Tiempo(días)</i>	<i>Costo Unitario</i>	<i>Valor HH</i>	<i>Costo Total</i>
<i>Hotel</i>	1	15	\$ 100.000		\$1.500.000
<i>Alimentación</i>	1	15	\$ 30.000		\$ 450.000
<i>Hidratación</i>	1	15	\$ 5.000		\$ 75.000
<i>Supervisor Mecánico</i>	1	15	\$ 2.500.000	\$ 15.938	\$2.151.563
				Total	\$3.585.938

Fuente: Elaboración propia

En este como en cualquier montaje se tienen costos de operación, en los cuales se tiene en cuenta desde el supervisor mecánico encargado, hasta los costos primordiales como estadía y vivienda, es importante tener en cuenta estos costos adicionales a la hora de calcular la viabilidad económica del proyecto, teniendo en cuenta el número de días que se necesitan para el montaje y puesta en marcha.

Tabla 50. Resumen costos de personal

PERSONAL	5.508.000
CONEXIÓN	
COSTO INGENIERIL	6.878.188
COSTO OPERACIONAL	3.585.938
TOTAL	15.972.126

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 50., se determina el valor total de los costos de personal que maneja el proyecto, donde se tiene en cuenta las horas trabajadas, los ingenieros, operarios capacitados y ayudantes, y hasta costos básicos como la alimentación y estadía.

6.5 INVERSION INICIAL

TOTAL: 217.043.530\$ Moneda Corriente.

6.6 FLUJO DE CAJA

Para determinar el flujo de caja del proyecto se toman las consideraciones necesarias que permiten calcular ingresos y costos del proyecto, a partir de allí se calculan indicadores económicos que demuestran la viabilidad del proyecto para la empresa del sector alimenticio en Sopó.

Tabla 51. Flujo de caja

Flujo sin financiación

Año	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$ 352.413.300	\$ 352.413.300	\$ 352.413.300	\$ 352.413.300	\$ 352.413.300
Costos de producción		\$ 153.736.700	\$ 153.736.700	\$ 153.736.700	\$ 153.736.700	\$ 153.736.700
Flujo operativo		\$ 198.676.600	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600
Inversión	-\$ 217.043.530					
Valor de salvamento						
F.C.L	-\$ 217.043.530	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600	\$ 198.676.600
TIO	10%					
VPN	536097096,67	A				
TIR	87,6%	B				

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación financiera se realiza con una proyección a 5 años, tiempo en el cual se determinan ingresos y costos del proyecto.

6.5.1 Ingresos. Para el cálculo de los ingresos del proyecto se tienen diferentes consideraciones en cuenta, por ejemplo, el costo que tiene para la empresa la procedencia de agua utilizada, en este caso se trata de agua de pozo.

Uno de los factores más importantes en este ámbito es la eficiencia del proceso, ya que de ella depende que tanta agua logra ser tratada en un sistema UF.

Tabla 52. Costo de agua

Tipo de Agua	Costo m ³
Agua de Pozo	\$500
Agua Acueducto	\$3.600

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 52., muestra el costo que tiene para la empresa el agua que utiliza según su procedencia de allí y a partir de la eficiencia que da la UF según simulación (ver anexo 1), que tiene un valor de 89%, se calcula los ingresos que genera a la empresa utilizar un sistema de ultrafiltración a la salida de la PTAR.

Ecuación 8. Flujo de PTAR

$$F_{año} = 65995 \frac{m^3}{mes} * \frac{12 mes}{1 año}$$

$$F_{año} = 791940 \frac{m^3}{año}$$

En la ecuación 7., se determina el caudal de vertimiento a la salida de la PTAR en cada año, donde según el diagnóstico desarrollado se tiene un valor promedio mensual.

Ecuación 9. Agua tratada

$$Agua_{tratada} = F_{año} * E$$

$$= 791940 \frac{m^3}{año} * 0,89$$

$$= 704826,6 \frac{m^3}{año}$$

La Ecuación 8. Permite identificar el caudal de agua que la membrana trata, teniendo en cuenta las posibles pérdidas de agua que se dan por procedimientos de parada o mantenimiento CIP desarrollado con agua ultra filtrada.

Por último, se determina la ganancia que genera a la empresa tratar esta corriente de agua que actualmente va a vertimiento, teniendo en cuenta que el agua utilizada es agua de pozo.

Ecuación 10. Ingresos anuales

$$\begin{aligned} I_{anuales} &= Agua_{tratada} * \$ \\ &= 704826,6 \frac{m^3}{año} * 500\$ \\ &= 352.413.300 \$ \end{aligned}$$

La Ecuación 9. da como resultado el valor que gana la empresa anualmente al aprovechar la corriente de agua residual industrial. **352.413.300\$** pesos.

6.6.1 Costos. Para determinar los costos que puede llegar a generar una UF durante su operación se deben evaluar aspectos importantes como mantenimiento, operación e imprevistos.

El mantenimiento de la membrana es propuesto por la simulación bajo ciertas condiciones en diferentes periodos de tiempo, de allí se parte para evaluar el costo en producto químico para el mantenimiento de la membrana. El sistema requiere la utilización de 3 productos químicos que se pueden encontrar en el mercado, las empresas con sus diferentes proveedores proporcionan información acerca del costo de las materias primas utilizadas.

- **Soda caustica**

La simulación proporciona el caudal que debe llegar a las membranas de este producto químico, en este caso es de 222 L/h, para facilidades de cálculo se realiza la conversión, también se tiene en cuenta que se requiere tratar la membrana con este producto y a este flujo por un tiempo de 80 segundos cada 16 horas, a continuación, se muestra el cálculo matemático para determinar el costo de la soda caustica por año.

Ecuación 11. Flujo de bomba

$$222 \frac{l}{h} * \frac{1h}{3600 Seg} = 0,06166667 \frac{L}{Seg}$$

Ecuación 12. Volumen de producto químico

$$0,06166667 \frac{L}{Seg} * 80 seg = 4,933333 L$$

Se determina el volumen que se consume cada que se desarrolle el tratamiento a la membrana con soda caustica (Ecuación 11).

Ecuación 13. Volumen según frecuencia de mantenimiento

$$4,933333 L * 3 = 14,8 L$$

En la ecuación 12. se multiplica el volumen de producto químico por 3, teniendo en cuenta que la operación con soda caustica se realiza cada 16 horas, así se identifica que volumen de producto se gasta cada 2 días y 3 mantenimientos.

Ecuación 14. Costo del producto químico

$$14,8L * 50.000\$ = 740.000 \$$$

El costo por litro de soda caustica según la concentración necesaria (ver anexo 1) oscila en un valor de 50.000 \$, este permite calcular el costo que genera a la empresa utilizar este producto cada 2 días y por ende cada 3 procesos de mantenimiento.

Ecuación 15. Costo anual

$$\frac{740.000\$ * 240 dias}{2} = 88.800.000\$$$

La ecuación 14. Muestra el costo que genera a la empresa el uso de este producto para el mantenimiento de la membrana, aquí se tiene en cuenta los días de operación de la planta al año (240), y se divide en 2 con el fin de obtener el gasto diario del producto.

- **Clorina / Cloro**

Para determinar el costo de los productos químicos en el mantenimiento se realiza el mismo procedimiento (ecuaciones 10-14), donde varía el flujo de la bomba, el tiempo de inyección de producto y el periodo con el que se debe realizar. Estos datos están sujetos a la simulación desarrollada (ver Anexo 1).

En el caso del cloro, se aplica en dos mantenimientos diferentes, es decir acompañado de soda caustica en uno y de ácido en el otro, por esta razón el procedimiento se realiza por duplicado, donde solo cambia el tiempo y periodo de inyección (las ecuaciones acompañadas de * hacen referencia al segundo mantenimiento con cloro, 80 segundos cada 16 horas).

$$165 \frac{l}{h} * \frac{1h}{3600 \text{ Seg}} = 0,0459722 \frac{L}{\text{Seg}}$$

$$0,0459722 \frac{L}{\text{Seg}} * 45 \text{ seg} = 2,06875L$$

$$* 0,0459722 \frac{L}{\text{Seg}} * 80 \text{ seg} = 3,677778L$$

Los tiempos con los que se desarrolla el mantenimiento con cloro son 45 y 80 segundos, a partir y del flujo de la bomba se determina los litros de cloro gastados en cada uno de los procesos.

$$2,06875 L * 1 = 2,06875L$$

$$* 3,677778L * 3 = 11,033333 L$$

En el primer caso se recomienda el uso de cloro cada 24 horas por eso el valor obtenido es el gasto de cloro en litros en un día.

En el segundo caso (*) se sugiere realizarlo cada 16 horas razón por la cual se multiplica por 3 y se obtiene el gasto de cloro cada 2 días.

$$2,06875L * 3.000\$ = 6.206,25 \$$$

$$* 11,033333L * 3.000\$ = 33.100\$$$

El costo comercial del cloro para la empresa es de 3000\$ por litro, según esto en el primer caso se obtiene el costo diario de cloro y en el segundo (*) el costo cada dos días.

$$6.205,25 * 240 = 1.489.500\$$$

$$* \frac{33.100\$ * 240 \text{ dias}}{2} = 3.972.000\$$$

Por último, se determina el costo anual en cada uno de los casos, donde se multiplica por los días de operación de la planta y en el segundo caso (*), se divide en 2 debido a que anteriormente se había calculado el costo cada 2 días.

- **Ácido sulfúrico**

La determinación del costo anual por mantenimiento con ácido se realiza partiendo de que se debe realizar durante 80 segundos cada 16 horas; la bomba debe garantizar un flujo de 134,9 L/h. En este caso también se utilizan las ecuaciones 9-13 en el mismo orden.

$$134,9 \frac{l}{h} * \frac{1h}{3600 \text{ Seg}} = 0,03747222 \frac{L}{\text{Seg}}$$

$$0,0374722 \frac{L}{\text{Seg}} * 80 \text{ seg} = 2,9977778L$$

$$2,9977778L * 3 = 8,9933333 L$$

Al obtener que volumen de ácido se gasta cada 2 días, se determina el costo para este mismo periodo de tiempo.

$$8,993333L * 6.000\$ = 53.960\$$$

Según el costo comercial del ácido sulfúrico, cada dos días se realiza un gasto de 53.960\$ para realizar el mantenimiento de forma adecuada.

$$\frac{53.960\$ * 240 \text{ dias}}{2} = 6.475.200\$$$

La operación inmediatamente anterior muestra el costo anual de mantenimiento al sistema con ácido sulfúrico.

Tabla 53. Costos adicionales

costo	valor/mes	valor/ año
Operarios (2)	\$ 2.000.000	\$ 24.000.000
Imprevistos	\$ 416.667	\$ 5.000.000
Costos operacionales	\$ 2.000.000	\$ 24.000.000
	TOTAL	\$ 53.000.000

Fuente: *Elaboración propia.*

La Tabla 53., muestra costos que deben ser tenidos en cuenta en cada proyecto, en cuanto a los operarios necesarios no son un número representativo, sabiendo

que el proceso físico es realizado por las diferentes membranas, sin embargo, se requiere control y la presencia de operarios es importante para garantizar el buen funcionamiento del sistema. Los imprevistos que se pueden generar en un UF se ven guiados hacia fallas energéticas de la bomba, o posibles cambios en la calidad de agua que obliguen a realizar procedimientos de parada para la posterior revisión del sistema. Los costos operacionales van guiados a los generados por aspectos como la energía utilizada por las bombas o mantenimientos predictivos que sean necesarios.

Tabla 54. Resumen costos

costo	valor/ año
Adicionales	\$ 53.000.000
Soda caustica	\$ 88.800.000
Cloro	\$ 5.461.500
Ácido sulfúrico	\$ 6.475.200
TOTAL	\$ 153.736.700

Fuente: *Elaboración propia.*

En la Tabla 54., se encuentra consignado en resumen los costos del proyecto anuales, el total de los costos es de **153.736.700 \$**.

Con los datos de costos, ingresos e inversión calculados anteriormente se desarrolla el flujo de caja del proyecto (ver Tabla 44.), allí se puede evidenciar el flujo de caja libre durante los cinco años que se evalúa el proyecto.

6.7 INDICADORES

En la Tabla 51., se determina el valor presente neto del proyecto y la tasa interna de retorno, indicadores que permiten evaluar la viabilidad financiera de un proyecto a partir de flujos de caja que contemplan el movimiento financiero del proyecto.

Tabla 55. Indicadores

indicador	valor
VPN	536097096,67
TIR	0,875980151

Fuente: *Elaboración propia.*

La tasa interna de retorno (TIR) tiene un valor de 87% en este caso, analíticamente se determina que el proyecto es viable ya que supera la tasa interna de oportunidad que es del 10% para la empresa.¹

En cuanto al VPN la condición es que se acepta el proyecto si se obtiene un valor positivo, en este caso al igual que la TIR este indicador sugiere la aceptación del proyecto.

6.8 RELACIÓN BENEFICIO-COSTO

Este indicador de evaluación de proyectos se calcula para demostrar que el sistema UF propuesto es viable desde el punto de vista financiero, para ello se realiza su cálculo matemático.

Como primera medida se necesita de los flujos de caja donde se evalúa el proyecto para llevarlos al valor actual neto (VNA).

Tabla 56. VNA

	VNA
INGRESOS	\$1.335.923.675
COSTOS	\$799.826.578,33

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 56., da a conocer los valores de VNA calculados por medio de los flujos de ingresos y costos. La inversión inicial también es tenida en cuenta ya que es un flujo negativo durante el proyecto, razón por la cual es sumada directamente al valor actual neto, además que la inversión debe desarrollarse en el año cero (momento actual).

La relación beneficio costo (RBC) es la relación entre el valor presente de los ingresos y egresos.

Ecuación 16. RBC

$$RBC = \frac{VNA_{ingresos}}{VNA_{egresos}}$$

$$\frac{\$1.335.923.675}{\$799.826.578.33} = 1,6702$$

La Ecuación 15., determina el valor de la relación beneficio costo, donde se obtiene un valor mayor a 1 y permite concluir que los ingresos netos superiores toman un

valor mayor a los egresos y en este periodo de tiempo el proyecto es viable económicamente.

En busca de comparar se calcula el costo de agua tratada

Ecuación 17. Costo UF

$$\begin{aligned} \text{Costo mes} &= \frac{153736700}{12} \\ &= 12.811.391 \text{mes} \\ \text{costo dia} &= \frac{12811391}{30} \\ &= 427.046 \\ \text{Costo hora} &= \frac{427046}{24} \\ &= 17.793 \end{aligned}$$

El costo que tiene por hora utilizar este sistema UF en la planta de Sopó es de 17.793 COP y teniendo en cuenta que cada membrana llega a tratar 9 m³/h el metro cubico de agua tiene un costo de 1977 COP, el cual al compararlo con el costo de agua de pozo o acueducto es más económico.

Ecuación 18. Costo UF 5 años

$$\text{Costo 5 años} = 153736700 * 5 = 768683500$$

Al compararlo con el costo de agua de pozo el cual es \$500 COP m³ o el costo de agua de acueducto el cual es de \$3600 COP m³ se ve notoriamente que es mucho más económico a largo plazo. El uso de la membrana disminuirá para la empresa el uso de agua para el proceso.

7. CONCLUSIONES

- La empresa del sector alimenticio ubicada en Sopó Cundinamarca, tiene grandes sistemas de operación y diferentes áreas de producción que le permiten tener un excelente posicionamiento en el mercado nacional e internacional. Como consecuencia de la producción masiva de productos alimenticios, se evidenció que genera un amplio consumo de recurso hídrico, el cual no solo debe ser tratado para cumplir normatividad de vertimiento, sino también como posible corriente de recirculación a los diferentes procesos de la empresa.
- La caracterización desarrollada a la corriente de salida de la PTAR, y el análisis de los límites operativos de la membrana, permitieron deducir que no es necesario realizar pretratamiento en el sistema UF propuesto.
- Al realizar el montaje y puesta en marcha del piloto UF se identificaron las consideraciones y límites operacionales a los cuales debe trabajar el sistema, teniendo en cuenta las necesidades de caudal y calidad de agua por la empresa.
- La experimentación con el piloto de ultrafiltración, permitió corroborar la viabilidad técnica de las membranas con estas aguas residuales de esta industria alimenticia, en donde el agua tratada que se obtuvo cumplió con las características necesarias para ser reutilizada en el proceso y la opción de realizar el sistema a nivel industrial, obteniendo valores de turbidez menores a 1 de DBO y sólidos totales menores a 5 mg/L cumpliendo la resolución 2115 de 2010 y la calidad de agua exigida por la empresa.
- El desarrollo y análisis financiero demostró que el sistema planteado para su implementación a nivel industrial cumple con los requerimientos que abarca un montaje de semejante magnitud y que este atraerá una disminución económica frente al costo de agua por litro considerable comparada con la actual debido a que no se tiene en cuenta esa corriente de salida. Indicadores como la RBC (1,6 > 1) muestran que el proyecto es viable a nivel financiero.

8. RECOMENDACIONES

- En la parte experimental 2 se utilizaron flujos mayores al recomendado por la simulación, se sugiere evaluar la UF con menores pero cercanos para garantizar que la membrana no sufra daños.
- Se recomienda en la parte experimental 1 cambiar las concentraciones de coagulantes manteniéndolo dentro los límites propuestos para analizar diferentes comportamientos en el sistema.
- En cuanto al tipo de coagulante utilizado se recomienda variar para evaluar el efecto que puede llegar a tener dentro del sistema UF.

BIBLIOGRAFIA

BANCO DE LA REPUBLICA. Economía de Bogotá.[En línea] Disponible en: http://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/ber_bogota_tri1_2017.pdf (Consultado el 24 de julio de 2017)

CAPACITACIÓN. Liqui-cell y liqui-Flux.[En línea] Disponible en: <https://www.dropbox.com/scl/fi/cy0rob3bv59kbytj2mmxn/3M%20Liqui-Cel%20%26%20LiquiFlux%20SPANISH%20Training%20NOVEMBER%202016.pdf>

DANE. Pib Bogotá. [En línea] Disponible en: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-departamentales/cuentas-nacionales-departamentales-pib-trimestral-bogota-d-c> (Consulta el 29 de julio de 2018)

DANE.Boletin técnico pib [En línea] Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/pib/bol_PIB_ltrim18_produccion_y_gasto.pdf (consultado el 6 de Agosto de 2018)

DANE.Boletin técnico empleo [En línea] Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ech/ech/bol_empleo_jun_17.pdf (consultado el 03 de agosto de 2018)

DECRETO NÚMERO 1575 DE 2007 [En línea] Disponible en: <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/Disponibilidad-del-recurso-hidrico/Decreto-1575-de-2007.pdf>. (consultado 14 de noviembre de 2018).

EFECTO DE LA LIMPIEZA QUÍMICA EN LA PERMEABILIDAD DE MEMBRANAS CERÁMICAS DE ULTRAFILTRACIÓN, José Edgar zapata Montoya. [En línea] Disponible en: <https://hera.ugr.es/tesisugr/16427300.pdf> (consultado el 21 de septiembre de 2018)

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486-6166.Bogotá D.C.: El instituto, 2018. ISBN 9789588585673 159 p.

LIQUI. Manual técnico. [En línea] Disponible en: https://www.dropbox.com/scl/fi/zcfev11tqrjpb5os321a/LiquiFlux_Technical%20Manual%20SPANISH.pdf

Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible RESOLUCIÓN NÚMERO 1207 DE 2014. [En línea] Disponible en: Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/>

normativa/Res_1207_2014.pdf MINISTERIO DE LA PROTECCION SOCIAL el 20 (consultado 14 de noviembre de 2018).

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL RESOLUCIÓN NÚMERO 2115
[En línea] Disponible en: http://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegralDelRecursoHidrico/pdf/Legislaci%C3%B3n_del_agua/Resoluci%C3%B3n_2115.pdf. (consultado 14 de noviembre de 2018).

MUESTREO DE AGUAS RESIDUALES Y TIPOS DE ANÁLISIS EMPLEADOS, Fibras y Normas de Colombia S.A.S. [En línea] Disponible en: <https://www.fibrasynormasdecolombia.com/terminos-definiciones/muestreo-de-aguas-residuales-y-tipos-de-analisis-empleados> (consultado el 20 de Noviembre de 2018).

OCEANÍA INQUIETA AL CAMPO COLOMBIANO, Ferney Arias Jiménez. [En línea] Disponible en: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/13210/1/innova.front/colombia:-leche-carne-y-azucar-de-oceania-inquieta-al-campo-colombiano.html> (consultado el 30 de Agosto de 2018)

PENTAIR, Guía de aplicaciones de ultrafiltración freshpoint, filtración y proceso, 2015

PORTAL LECHERO. Oceanía inquieta al campo Colombiano empleo [En línea] Disponible en: <https://www.portalechero.com/innovaportal/v/52/1/innova.front/noticias-de-colombia.html> (consultado el 07 de agosto de 2018)

PRECIO NACIONAL LECHE, Asoleche. [En línea] Disponible en: <https://asoleche.org/leche-en-cifras/> (consultado el 24 octubre de 2018)

REVISTA DINERO. TLC con Nueva Zelanda [En línea] Disponible en: [https://www.dinero.com/pais/articulo/asoleche-se-opone-a-los-tlc-entre-colombia-y-nueva-zelanda/258943pdf\(consultado](https://www.dinero.com/pais/articulo/asoleche-se-opone-a-los-tlc-entre-colombia-y-nueva-zelanda/258943pdf(consultado) el 08 de agosto de 2018)

TASA INTERNA DE RETORNO, jannier Duque Navarro.[En línea] Disponible en: <https://www.abcfinanzas.com/administracion-financiera/tasa-interna-de-retorno-tir> (consultado el 30 de octubre de 2018)

ULTRAFILTRACIÓN DEL AGUA, Ecopreneur. [En línea] Disponible en: <https://www.ecopreneur.cl/ultrafiltracion-del-agua-agua-de-alta-pureza/> (consultado el 25 Agosto de 2018)

ULTRAFILTRACIÓN, Hidriagua. [En línea] Disponible en:
<http://www.hidroagua.com.mx/ultrafiltracion.html> (consultado el 25 de septiembre de 2018)

ANEXOS

ANEXO A. SIMULACIÓN




LiquiCAD™ Ultrafiltration Design Calculation

Customer:	DPWatering - Alpina	Company:	3M	Date: 22/ Oktober 2018
Project name:	Reúso Efluente PTAR Sopo	Calculated by:	S.pino	Revision:
Project number:				

Feed water:

Water type:	Waste water(Municipal)	Pre-treatment:	Cribado grueso, trampa grasas, DAF, UASB, Lodos activados, Sedimentador	Remark: Validar el uso de coagulante para oxidación de materia orgánica. Se debe realizar el análisis hidráulico del tanque de tratamiento
Turbidity [NTU]:	6.6			
TSS [ppm]:		Other:		
Temperature [°C]:	23.5 (74.3 °F)			
DOC [ppm]:				
COD [ppm]:	96			
Inline coagulation:	None			

System design: **Operating mode:** **Dead-End with 0 % backwashwater - reuse**

Module type:	Membrane area per module [m²]:	Number of racks:	Modules per rack:	Membrane area per rack [m²]:	Modules total:	Membrane area total [m²]:
Liqui-Flux® W10-08N	75	2	14	1050 (11302 ft²)	28	2100 (22604 ft²)

Recovery [%]:	Gross flux [l/m²/h]:	Net flux [l/m²/h]:	Filtration time [min]:	Backwash time [sec]:	Forward flush time [sec]:	CEB 1 frequency [h]:	CEB 2 frequency [h]:
89.6	57.1	51.2	40	50	-	24.0	16

Process flows, total:

Average feed flow total [m³/h]:	Max.feed flow total [m³/h]:	Filtrate flow total [m³/h]:	Conc.discharge total [m³/h]:
120.0	125.7	107.6	-

Process flows, total:

Average feed flow total [m³/h]:	Max.feed flow total [m³/h]:	Filtrate flow total [m³/h]:	Conc.discharge total [m³/h]:
120.0	125.7	107.6	-

Process flows per rack:

Average feed flow [m³/h]:	Max.feed flow [m³/h]:	Filtrate flow [m³/h]:	Backwash flow [m³/h]:	Fwd.flush flow [m³/h]:	CEB 1 flow [m³/h]:	CEB 2 flow [m³/h]:	Conc.recirculation: [m³/h]:
60.0	62.8	53.8	263		263	131.3	-

Chemical flows per rack:

CEB 1 pump flow l/h NaOCl:	CEB 2 pump flow l/h NaOH 35%:	CEB 2 pump flow l/h NaOCl:	CEB 2 pump flow l/h H2SO4 38%:	Cogulant pump flow:
166	222	166	135	0 l/h None

CEB parameter: CEB 1 (chlorine): CEB 2 (caustic): CEB 2 (acid):

CEB rinse time[sec]:	45	80	80
CEB soaking time[min]:	3	10	5
Backwash time[sec]:	45	80	80
NaOCl concentration added to CEB [%]:	-	0.02	-

CIP Parameter:

CIP interval [d]:	180
-------------------	-----

Disclaimer:

3M as a module producer does not provide any rack or application design. The modules have to be tested by the customer in the application intended by the customer. This proposal is based on the user-supplied parameters and experience data of 3M and shall only serve as a basis for such testing and shall therefore not bind 3M in any whatsoever way. 3M does not warrant any system-performance contained in this proposal. For the avoidance of doubt, this proposal shall not be a part of the final purchase contract.

Liqui-Flux® is a registered trademark of 3M.



Liqui-Flux® Ultrafiltration Design Calculation

Customer: DPWatering - Alpina
 Project name: Reúso Efluente PTAR Sopo
 Project number:

Company: 3M
 Calculated by: S.pino

Date: 22/ Oktober 2018
 Revision:

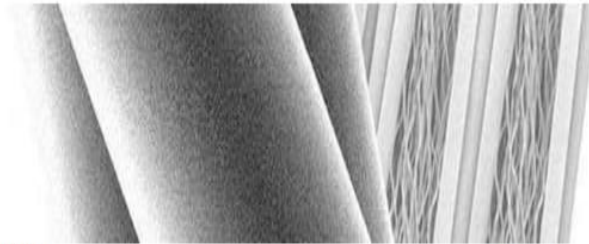
Chemical consumption and waste water:

Chemicals:

	Type	Target pH / concentration in CEB	Pump flow rate [l/h]	l/CEB per rack	l/d total
CEB 2 caustic:	NaOH 35%	12 - 12,5	222.2	4.9	14.8
CEB 2 acid:	H2SO4 38%	2	134.9	3.0	9.0
CEB 2 chlorine:	13% NaOCl	0.020%	165.5	3.7	11.0
CEB 1 chlorine:	13% NaOCl	0.010%	165.5	2.1	4.1

Waste water:

	Volume per cleaning cycle per rack [m³]	Volume per day total [m³]	Number of cycles per day	Amount of backwash water to be reused [m³/d]	Amount of conc. discharge to be reused [m³/d]
Backwash:	3.6	251	34.4	-	-
Concentrate discharge:	-	-	-		
CEB1:	6.6	13	1.00		
CEB2:	11.7	35.0	1.50		



© 2018 Liqui-Flux, Inc.
All rights reserved.
Liqui-Flux is a registered trademark of Liqui-Flux, Inc.

LiquiCAD™ Ultrafiltration Design Calculation

Date: 22/10/18

Revision:

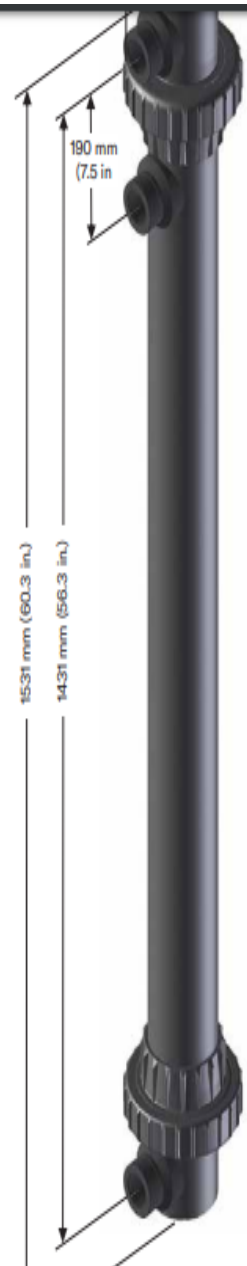
03 Design Summary

Project name:	Rechen Fluente PTAR Soyn	Water type:	Waste water(Municipal)	Max feed flow:	125.7 m ³ /h
Company:	3M	Operating mode:	Dead-End	Average feed flow:	120.0 m ³ /h
Customer:	DPWatering - Alpina	Turbidity:	6.6 NTU	Filtrate flow:	107.6 m ³ /h
Project number:		Temperature:	23.5 °C	Recovery:	89.6 %
Calculated by:	S.pino	TSS:	ppm	Gross flux:	57.1 l/m ² /h
Pre-Treatment:	Cribado grueso, trampa grasas, DAF, UASB, Lodos activados, Sedimentador	DOC (ppm):	ppm	Net flux:	51.2 l/m ² /h
		CO2 (ppm):	96 ppm	Display:	Default
		Module type:	Liqui-Flux® W10-Q8N		
Remark:	Validar el uso de coagulante para oxidación de materia orgánica. Se debe realizar el análisis hidráulico del tanque de igualación para considerar la opción de retornar el agua de retrolavado y aumentar	Modules per rack:	14	< Back	Customize >
		Number of racks:	2	Print Page	Print Report
		Total no. of modules:	28		
		Total membrane area:	2100 m ² (22415 ft ²)		

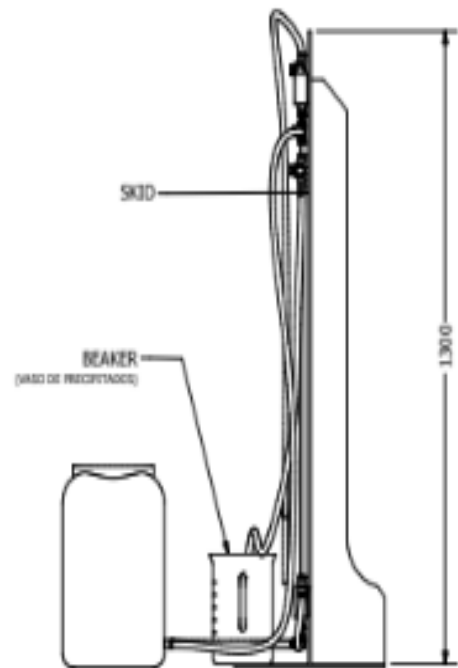
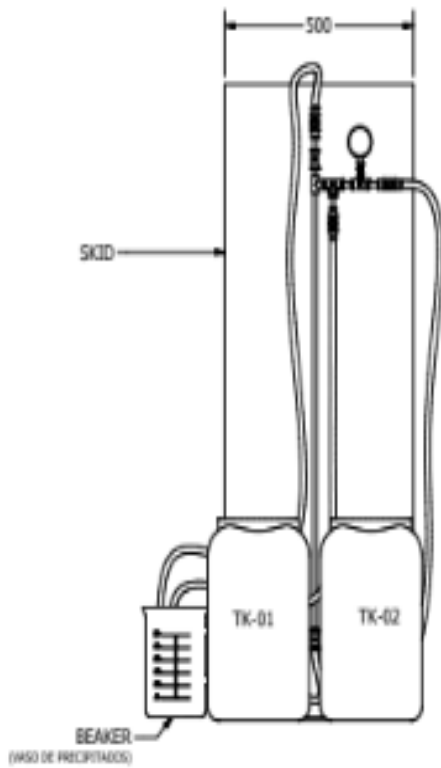
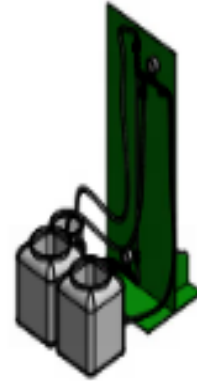
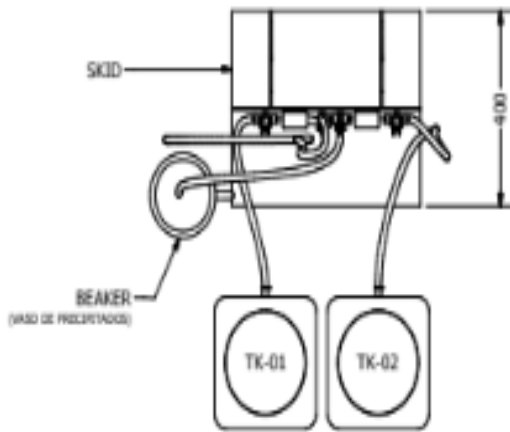
Fuente: Liqui Cad Ultrafiltration Design Calculation

ANEXO B. MÓDULO W05

Applications	
Intended Use	Ultrafiltration
Membrane Characteristics	
Membrane Type	Hollow fiber, inside - out
Membrane Material	Polyethersulfone
Outer/Inner Diameter	1.2 mm / 0.8 mm
Burst Pressure	≥1200 kPa (174 psi)
Membrane Configuration	Multifiber P.E.T. Technology
Housing Characteristics	
Housing Material	PVC
Potting Material	Polyurethane
Sealing End Caps	EPDM
Connectors	Victaulic® 60.3 mm
Weight, Dry	9 kg (20 lbs)
Weight Filled with Liquid	18 kg (40 lbs)
Effective Membrane Surface Area	8.7 m ² (94 ft ²)
Maximum Working Pressure	600 kPa (87 psi) @ 20°C (68°F)
Maximum Working Temperature	40°C (104°F) @ 150 kPa (22 psi)
Typical Application / Operating Data	
Operating Mode	Dead-End / Cross-Flow
Typical Flux Range, Filtration	50 - 150 l/m ² h (29 - 88 gal/ft ² day)
Typical Flux, Backwash	250 l/m ² h (147 gal/ft ² day) (-10% / +20%)
Filtrate Flow Rate Range	0.4 - 1.3 m ³ /h (1.9 - 5.7 gpm)
Typical Transmembrane Pressure, Filtration	10 - 70 kPa (1.5 - 10 psi)
Typical Transmembrane Pressure, Backwash	50 - 200 kPa (7 - 30 psi)
Maximum Transmembrane Pressure, Filtration	250 kPa (36 psi)
Typical Cleaning Chemicals	NaOH, HCl, NaOCl
pH-range During Cleaning	1 - 13
Maximum Instantaneous Free Chlorine Concentration	200 ppm @ pH ≥9.5
Maximum Free Chlorine Exposure	200000 ppm h @ pH ≥9.5



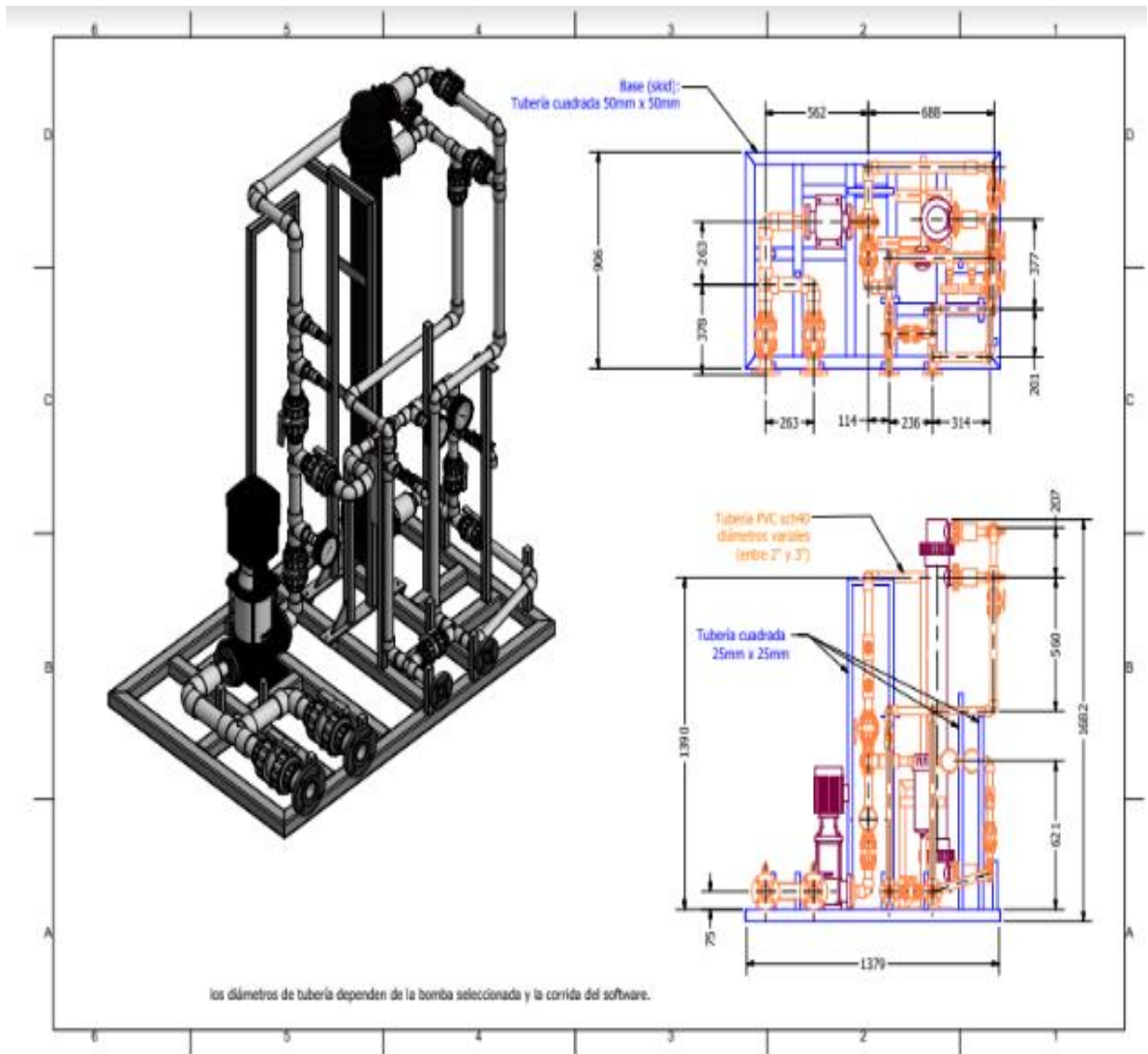
ANEXO C. PILOTO



**ANEXO D.
3D ULTRAFILTRACIÓN**



ANEXO E. PLANOS UF



ANEXO F. P&ID

