DISEÑO DE UN EVAPORADOR AL VACIO PARA LA POTABILIZACION DE LAS AGUAS.

Autor

CARLOS ANDRES ESCOBAR CHITIVA

Director

Ph. D JULIO ISAAC MALDONADO

Codirector
Ph. D JUAN CARLOS SERRANO RICO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA NORTE DE SANTANDER
2024

DISEÑO DE UN EVAPORADOR AL VACIO PARA LA POTABILIZACION DE LAS AGUAS.

Autor

CARLOS ANDRES ESCOBAR CHITIVA

Trabajo final para la obtención del título de:
INGENIERO AMBIENTAL

Director
Ph. D JULIO ISAAC MALDONADO

Codirector
Ph. D JUAN CARLOS SERRANO RICO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURA
INGENIERIA AMBIENTAL
PAMPLONA NORTE DE SANTANDER
2024

AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas de mi entorno familiar que con su amor y paciencia demostraron fortaleza en los momentos en los que mi formación académica fue más un obstáculo que un avance así mismo agradezco a todo el personal educativo de la universidad de pamplona por su dedicación en la formación e instrucción de futuros profesionales.

Tabla de contenido

1. INTRODUCCION ---------- 11

1.1. Planteamiento del problema ---------- 11

1.2. Objetivos ---------- 12

2. MARCO TEORICO ---------- 13

2.1. Generalidades sobre el agua ---------- 13

2.1.1. Características del agua ---------- 13

2.1.2. Propiedades del agua ---------- 14

2.1.3. Usos del agua ---------- 15

2.2. Potabilización de las aguas ---------- 16

2.2.1. Normatividad sobre potabilización del agua ---------- 18

2.2.2. Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua ---------- 18

2.2.3. Coagulación ---------- 22

2.2.4. Floculación ---------- 28

2.2.5. Sedimentacion ---------- **Error! Bookmark not defined.**

2.2.6. Filtration ---------- 35

2.2.7. Desinfección ---------- 37

2.3. Evaporación ---------- 39

2.3.1. Proceso de evaporación del agua ---------- 39

2.3.2. Tipos de evaporadores ---------- 39

2.3.3. Evaporación al vacío ---------- 43

2.3.4. Funcionamiento de la evaporación al vacío ---------- 44

2.4. Ecuaciones fundamentales ---------- 51

2.4.1. Balance de masa ---------- 51

2.4.2. Balance de energía ---------- 53

3. METODOLOGIA ---------- 57

3.1. Etapa de investigación ---------- 58

3.2. Etapa de diseño ---------- 67

3.3. Etapa de construcción ---------- 72

3.4. Etapa de operación ---------- 78

4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS ----------80

4.1. Pruebas de control----------80

4.2. Pruebas de laboratorio----------94

5. CONCLUSIONES ---------- 122

6. RECOMENDACIONES ---------- 123

7. BIBLIOGRAFÍA ---------- 124

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los contaminantes del agua *17*
Tabla 2. Valores máximos aceptables para las características físicas presentes en el agua *19*
Tabla 3. Valores máximos aceptables para las características químicas presentes en el agua *19*
Tabla 4. Valores máximos aceptables para las características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana *20*
Tabla 5. valores máximos aceptables para las características químicas que tienen mayores consecuencias sobre la salud humana *21*
Tabla 6. Valores máximos establecidos para características microbiólogas del agua potable *21*
Tabla 7. ventajas y desventajas del sulfato de aluminio como coagulante. *23*
Tabla 8. ventajas y desventajas del sulfato férrico como coagulante. *24*
Tabla 9. Valores de sumergencia en relación al ancho de la garganta en la canaleta *28*
Tabla 10. Valores de la presión de saturación del agua a diferentes temperaturas *45*
Tabla 11. Materiales y equipos usados en el prototipo de evaporador al vacío *72*
Tabla 12. Datos de operación para la prueba de control 1 ..... *80*
Tabla 13. Datos obtenidos en la prueba de control 1 ..... *81*
Tabla 14. Datos de operación para la prueba de control 2 ..... *82*
Tabla 15. Datos obtenidos en la prueba de control 2 ..... *83*
Tabla 16. Datos de operación para la prueba de control 3 ..... *85*
Tabla 17. Datos obtenidos en la prueba de control 3 ..... *85*
Tabla 18. Datos de operación para la prueba de control 4 ..... *87*
Tabla 19. Datos obtenidos en la prueba de control 4 ..... *87*
Tabla 20. Datos de operación para la prueba de control 5 ..... *89*
Tabla 21. Datos obtenidos en la prueba de control 5 ..... *89*
Tabla 22. Datos de operación para la prueba de control 6 ..... *91*
Tabla 23. Datos obtenidos en la prueba de control 6 ..... *91*
Tabla 24. Datos de operación para la prueba de control 7 ..... *93*
Tabla 25. Datos obtenidos en la prueba de control 7 ..... *93*
Tabla 26. Datos de operación para la prueba de laboratorio 1 ..... *95*
Tabla 27. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 1 ..... *96*
Tabla 28. Datos de operación para la prueba de laboratorio 2 ..... *98*
Tabla 29. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 2 ..... *98*
Tabla 30. Datos de operación para la prueba de laboratorio 3 ..... *101*
Tabla 31. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 3 ..... *101*
Tabla 32. Datos de operación para la prueba de laboratorio 4 ..... *104*
Tabla 33. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 4 ..... *104*
Tabla 34. Datos de operación para la prueba de laboratorio 5 ..... *107*
Tabla 35. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 5 ..... *107*

Tabla 36. Datos de operación para la prueba de laboratorio 6 ..... *110*
Tabla 37. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 6 ..... *111*
Tabla 38. Datos de operación para la prueba de laboratorio 7 ..... *113*
Tabla 39. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 7 ..... *114*
Tabla 40. Datos de operación para la prueba de laboratorio 8 ..... *116*
Tabla 41. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 8 ..... *117*
Tabla 42. Resumen de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio *119*
Tabla 43. Porcentaje de remoción de turbiedad en las pruebas de laboratorio *120*
Tabla 44. Porcentajes de remoción de color en las pruebas de laboratorio *121*

LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Uso del agua en los hogares *15*
Ilustración 2. Principales procesos en la potabilización del agua *16*
Ilustración 3. Esquema general de un proceso de potabilización de aguas. *17*
Ilustración 4. Sistema Normativo Colombiano sobre el uso del agua *18*
Ilustración 5. Proceso de unión de las coloides en la floculación. *22*
Ilustración 6. Esquema del ensayo de jarras a escala de laboratorio. *23*
Ilustración 9. Diversos tipos de Mezcladores mecánicos. *25*
Ilustración 10. Vertedero como mezclador. *26*
Ilustración 11. Esquema de una canaleta Parshall. *27*
Ilustración 12. Mecanismo de la floculación *29*
Ilustración 13. Tipos de floculadores mecánicos. *30*
Ilustración 14. Floculador de flujo horizontal. *31*
Ilustración 15. Floculador de flujo vertical *32*
Ilustración 16. Floculador de tipo Alabama *32*
Ilustración 17. Floculador de tipo COX. *33*
Ilustración 18. Esquema del movimiento del agua en un floculador COX. *34*
Ilustración 19. Trayectoria de partículas discretas en una cuenca de sedimentación. *35*
Ilustración 20. Ejemplos de sedimentadores *35*
Ilustración 21. Esquema de filtro con tanque elevado para lavado. *36*
Ilustración 22. Esquema de un filtro de arena lento. *37*
Ilustración 23. Sistema de dosificación de cloro para desinfección. *38*
Ilustración 24. Evaporador tipo Batch. *40*
Ilustración 25. Evaporador de circulación natural. *40*
Ilustración 26. Evaporador de película ascendente. *41*
Ilustración 27. Evaporador de película descendente. *41*
Ilustración 28. Evaporador de película ascendente y descendente. *42*
Ilustración 29. evaporador de circulación forzada. *42*
Ilustración 30. Evaporador de película barrida. *43*
Ilustración 31. Proceso general de operación de un evaporador al vacío *44*
Ilustración 32. Diagrama de Temperatura Vs volumen especifico de una sustancia pura. *46*
Ilustración 33. Transferencia de calor en un sistema cerrado *47*
Ilustración 34. Intercambiador de calor de carcasa y tubos. *48*
Ilustración 35. Intercambiador de calor tipo plato. *48*
Ilustración 36. Esquema de un intercambiador de flujo paralelo. *49*
Ilustración 37. Intercambiador de calor tipo contraflujo. *50*
Ilustración 38. Intercambiador de calor de flujo cruzado. *50*
Ilustración 39. Principio de conservación de la masa en un volumen de control. *52*

Ilustración 40. Esquema de un proceso de flujo no estacionario. *52*
Ilustración 41. Esquema de la conservación de la energía que sufre un objeto al caer de cierta altura. *53*
Ilustración 42. Marco metodológico de la investigación *57*
Ilustración 43. Componentes de la cámara de evaporación del prototipo de evaporador al vacío *59*
Ilustración 44. Esquema general del intercambiador para el prototipo de evaporador al vacío *62*
Ilustración 45. Esquema general para la bomba de vacío en el prototipo de evaporador al vacío *63*
Ilustración 46. Esquema general del prototipo de evaporador al vacío *67*
Ilustración 47. Montaje del prototipo de evaporador al vacío con sus partes *77*
Ilustración 48. Montaje del prototipo de evaporador al vacío en el laboratorio para su operación *78*
Ilustración 49. Planteamiento del método para la obtención de muestras y operación del prototipo en el laboratorio *79*
Ilustración 50. agua con colorante violeta y verde como medio de control *80*
Ilustración 51. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 1 ..... *81*
Ilustración 52. Resultados de la prueba de control 1 en laboratorio *82*
Ilustración 53. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 2 ..... *83*
Ilustración 54. Resultados de la prueba de control 2 en laboratorio *84*
Ilustración 55. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 3 ..... *85*
Ilustración 56. Resultados de la prueba de control 3 en laboratorio *86*
Ilustración 57. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 4 ..... *87*
Ilustración 58. Resultados de la prueba de control 4 en laboratorio *88*
Ilustración 59. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 5 ..... *89*
Ilustración 60. Resultados de la prueba de control 5 en laboratorio *90*
Ilustración 61. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 6 ..... *91*
Ilustración 62. Resultados de la prueba de control 6 en laboratorio *92*
Ilustración 63. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 7 ..... *93*
Ilustración 64. Resultados de la prueba de control 7 en laboratorio *94*
Ilustración 65. Muestra control usada en pruebas de laboratorio *95*
Ilustración 66. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 1 ..... *96*
Ilustración 67. Valores de color en la prueba de laboratorio 1 ..... *97*
Ilustración 68. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 1 ..... *97*
Ilustración 69. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 2 ..... *99*
Ilustración 70. Valores de color en la prueba de laboratorio 2 ..... *99*
Ilustración 71. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 2 ..... *100*
Ilustración 72. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 3 ..... *102*
Ilustración 73. Valores de color en la prueba de laboratorio 3 ..... *102*
Ilustración 74. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 3 ..... *103*
Ilustración 75. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 4 ..... *104*
Ilustración 76. Valores de color en la prueba de laboratorio 4 ..... *105*

Ilustración 77. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 4 ..... *106*
Ilustración 78. Zona de toma de muestra sector del hospital *106*
Ilustración 79. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 5 ..... *108*
Ilustración 80. Valores de color en la prueba de laboratorio 5 ..... *108*
Ilustración 81. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 5 ..... *109*
Ilustración 82. Zona de toma de muestra sector plazuela Almeida *110*
Ilustración 83. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 6 ..... *111*
Ilustración 84. Valores de color en la prueba de laboratorio 6 ..... *112*
Ilustración 85. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 6 ..... *112*
Ilustración 86. Zona de toma de muestra sector planta Cariongo *113*
Ilustración 87. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 7 ..... *114*
Ilustración 88. Valores de color en la prueba de laboratorio 7 ..... *115*
Ilustración 89. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 7 ..... *115*
Ilustración 90. Zona de toma de muestra sector estacón de policía *116*
Ilustración 91. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 8 ..... *117*
Ilustración 92. Valores de color en la prueba de laboratorio 8 ..... *118*
Ilustración 93. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 8 ..... *118*

1. INTRODUCCION

La evaporación en es un proceso físico lento y gradual en la que un líquido pasa a estado gaseoso, este proceso ocurre de manera natural y es conocido ampliamente desde la antigüedad donde los primeros asentamientos humanos mediante el uso del fuego fueron capaces de evaporar agua, con el avance de la ciencia y la investigación se ha ampliado el conocimiento de los procesos fisicoquímicos que han permitido descubrir ciertas propiedad de los fluidos que describen el comportamiento de estos, así mismo se logró ampliar la manera en la que se puedan usar estas propiedades para el desarrollo de tecnologías que presten un beneficio u utilidad en diversas áreas de la industria o la sociedad.

Algunas de esas propiedades termodinámicas presentes en los fluidos describen los procesos de cambio de fases de una sustancia y analiza el comportamiento de estas mediante los diagramas de temperatura y presión que a través de un proceso de investigación y diseño permiten el desarrollo de un prototipo de evaporador al vacío el cual es un equipo cuyo principio de funcionamiento es la relación que existe entre la presión y la temperatura de ebullición del agua.

Este tipo de equipos se presentan como una alternativa a las soluciones ya propuestas para afrontar los problemas relacionados con el acceso al agua potable en los contextos modernos de cambio climático y contaminación de las fuentes hídricas, así como el aumento de la demanda de los recursos hídricos por parte de la industria y las sociedades modernas.

1.1. Planteamiento del problema

El agua potable es uno de los recursos más necesarios actualmente para el desarrollo de las sociedades modernas, sus economías y estilos de vida desde hace milenios, las principales sociedades se asentaron sobre grandes flujos hídricos de los cuales abastecerse, pero el consumo de agua cruda para los humanos supone exponerse a enfermedades derivadas de la contaminación física, química y biológica que se encuentra en las fuentes naturales, ya en el siglo XIX se puede evidenciar esfuerzos importantes para la potabilización del agua en Paris y otras zonas del mundo.

Actualmente se tienen tratamientos efectivos como la coagulación-floculación, filtración y cloración para la eliminación de los componentes físicos y químicos que se encuentran suspendidos en el agua así como bacteriológicos e incluyendo procesos más avanzados haciendo

uso de las tecnologías más modernas para garantizar una correcta potabilización del recurso para consumo humano que se incrementa a nivel mundial y que según la OMS 2200 millones de personas carecen de acceso a servicios de agua potable gestionados de forma segura, una problemática que sin duda se verá incrementada por los efectos del cambio climático a nivel mundial que afectan las dinámicas naturales del ciclo hidrológico es por esto y en vista de buscar mecanismos y alternativas para suplir las limitaciones de acceso a agua potable aprovechando la propiedad del agua que permite evaporar dicha sustancia a bajas temperaturas (inferior a 100 grados centígrados) al disminuir la presión atmosférica que se plantea el siguiente interrogante ¿la evaporación al vacío puede ser usada como tratamiento para la potabilización del agua?.

1.2. Objetivos

Objetivo general

Diseñar un evaporador al vacío para la potabilización de las aguas de un afluente.

Objetivos específicos

- Identificar los fundamentos teóricos del funcionamiento de un evaporador al vacío.
- Dimensionar las partes que componen un evaporador al vacío a partir de los enunciados termodinámicos de masa y energía.
- Construir y operar el evaporador al vacío adaptado al proceso de potabilización a escala de laboratorio.
- Evaluar el funcionamiento en condiciones de laboratorio para los parámetros establecidos en la resolución 2115 de 2007 sobre la calidad del agua.
- Determinar la viabilidad de un evaporador al vacío en la potabilización de las aguas en relación a su construcción y operación.

2. MARCO TEORICO

2.1. Generalidades sobre el agua

El agua cuya fórmula química es H_2O es sin duda una de las sustancias más valiosas e importantes que existen en nuestro planeta, es una de las sustancias principales en el desarrollo de la vida y necesaria para su sustento y cumple un papel fundamental en el día a día de nuestras sociedades desde hace milenios cuando las primeras comunidades se establecieron sobre grandes fuentes hídricas como el rio Tigris y Éufrates, el Ganges y el Indo, así como el rio Amarillo y el rio Nilo.

Esta sustancia, aunque abundante en nuestro planeta pues el 70% de él está conformado por agua apenas el 2.5% es de agua dulce distribuida en todos los ecosistemas a lo largo y ancho de los continentes incluidos los polos, lugares en los que se manifiesta un intrincado sistema fisicoquímico que mantiene al agua en diversos estados cambiantes a lo largo del año que han dado forma a nuestro mundo natural y estilos vida.

2.1.1. Características del agua

El agua presenta una serie de características que la hacen destacar frente a otras sustancias, principalmente:

- Es una sustancia insípida, no posee un sabor propio y esta adoptara un sabor determinado según conque se encuentre mezclada y con qué cantidad pudiendo transmitir una gama de sabores que van desde ácidos hasta dulces, así como amargos etc.
- Es transparente, en su estado puro esta no posee un color determinado debido a que deja pasar casi por completo los rayos de luz, aunque en estado natural o “artificial” esta se encuentra mezclada con sustancias que interactúan con los rayos de luz dando distintos colores en función de la cantidad y el tipo de sustancia que se encuentre en el agua.
- Es inodora, no posee ningún tipo de olor característico y de igual manera que con el color esta podrá presentar olores según las sustancias que se encuentren mezcladas en el agua.
- Está conformada por 3 átomos 2 de Hidrogeno y uno de Oxigeno dando así la formula química del agua H_2O.

2.1.2. Propiedades del agua

En el medio ambiente el agua se puede encontrar en 3 estados, liquido, sólido y gaseoso que dan a está ciertas propiedades tanto físicas como químicas que se han estudiado a nivel de laboratorio.

- ***Estados:*** el agua puede encontrarse de manera natural en 3 estados, liquido, gaseoso y sólido. Estos estados dependen a su vez de propiedades como el punto de fusión, punto de congelación y el punto de ebullición.
- ***Densidad:*** la densidad está definida formalmente como la relación entre la masa y el volumen por la formula $\rho = \frac{m}{v}$ y para el agua su densidad es de 997Kg/m^3 en el sistema internacional.

  "La densidad del agua es 1g/cm3 (exactamente 0,99999 g/cm3 a 20 ºC) y, como sabemos aumenta anormalmente al elevar la temperatura de 0ºC a 4ºC, en la que alcanza su máximo valor 1g/cm3, exactamente a 3,98 ºC.**"** (Sánchez, Mendoza, & Méndez, 2005)

- ***Punto de fusión:*** este puede definirse como el cambio de estado de la materia de solido a liquido más concretamente se define como: *"*El punto de fusión es la temperatura a la cual se encuentra el equilibrio de fases sólido-líquido, es decir, la materia pasa de estado sólido a estado líquido, se funde." (castro, Alejandra, Gustavo, & Bravo, 2018)
- ***Punto de ebullición:*** esta es el cambio de estado líquido a gaseoso y se define como *"*La ebullición es un proceso físico en el que un líquido pasa a estado gaseoso. Se realiza cuando la temperatura de la totalidad del líquido iguala al punto de ebullición del líquido a esa presión." (castro, Alejandra, Gustavo, & Bravo, 2018)
- ***pH:*** o potencial de hidrogeno es un factor adimensional usado en química para la medida de la alcalinidad o la acides de una disolución que abarca un rango de 0 a 14 en una escala logarítmica y es definido también como la concentración de iones de hidrogeno en el agua.

2.1.3. Usos del agua

El agua ha sido para la humanidad desde las primeras civilizaciones muy importante y ha sido el eje central de diversas actividades tales como el transporte, el comercio, la salud y bienestar, la agricultura, etc. Estas actividades son fundamentales para nuestro desarrollo y actualmente con el aumento de la población y la aparición de una industrialización que manufactura bienes y servicios el uso que se le da al agua ha aumentado significativamente encontrando a esta sustancia en prácticamente la totalidad de las actividades humanas.

Los usos diarios que las personas dan al agua están relacionados con actividades como la cocina, el baño y aseo principalmente, para estas actividades se requiere una cantidad de agua que según la OMS (Organización Mundial de la Salud) esta no debe superar los 50 litros diarios y si bien este valor es elevado cuando se tiene en cuenta la cantidad de personas que hay en el planeta la cual es estimada para el 2023 en 7.9 billones de personas se debe tener en cuenta datos sobre el acceso al agua potable en el que “más de 2000 millones de personas viven en países con escasez de agua, situación que probablemente empeorará en algunas regiones como resultado del cambio climático y el crecimiento de la población.” (Organizacion Mundial de la Salud, 2022)



Ilustración 1. Uso del agua en los hogares. Fuente: Agencia europea del medio ambiente [19 de diciembre de 2018] https://www.cienciasambientales.com/es/noticias-ambientales/infografia-senales-uso-agua-hogares-17122

Los usos industriales del agua son diversos y abarca desde la producción de productos hasta el mantenimiento materias y equipos industriales y principalmente hace uso del agua potable la cual se definió como “la que cumple con las características físicas, químicas y microbiológicas, de tal manera que no genera un riesgo para la salud. El agua para consumo humano debe ser transparente, sin color ni sabor, y no debe tener sólidos suspendidos” (Minsalud, 2015).

2.2. Potabilización de las aguas

La potabilización de las aguas es el proceso a través del cual se eliminan sustancias, microorganismos, material orgánico y demás que puedan se nocivos o provocar efectos en la salud humana, así como generar una degradación al medio ambiente y consta de 3 procesos principales que son la coagulación, la floculación y sedimentación además de un pretratamiento y un proceso de filtración y cloración.

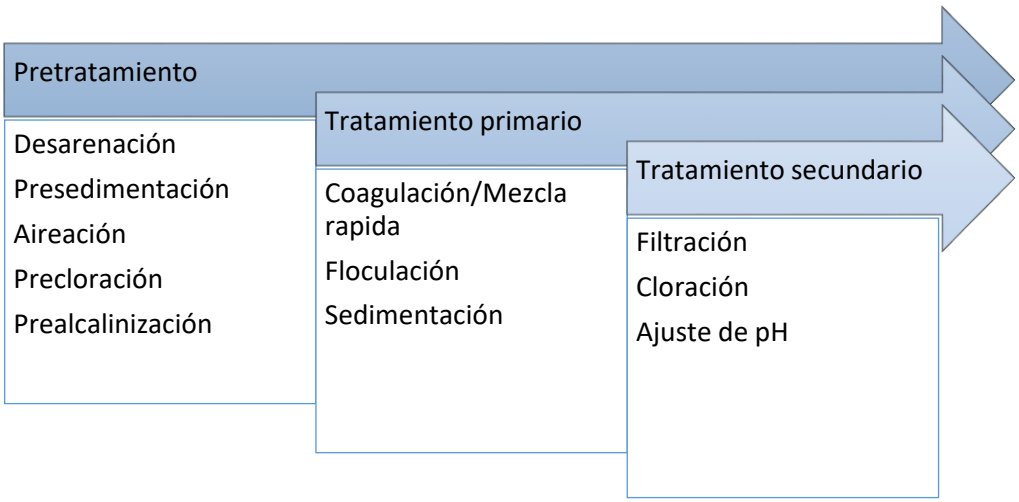


Ilustración 2. Principales procesos en la potabilización del agua

Los principales contaminantes que se pueden encontrar en el agua pueden derivar de fuentes naturales, así como de actividades humanas como la agricultura o actividades microbiológicas, estos contaminantes se incorporan al agua al ser este un solvente universal cambiando el color, sabor, pH, olor entre otros.

Tabla 1. Clasificación de los contaminantes del agua

Clasificación de los contaminantes presentes en el agua

Físicos	Químicos	Gaseosos	Biológicos
Color	Materia orgánica	Anhídrido carbónico	Bacterias
Olor y sabor	Acidez/alcalinidad	Metano	Hongos
Grasas y aceites	pH	Ácido sulfhídrico	Protozoos
Espumas	Nitrógeno		Algas
Radiactividad	Fosforo		Animales
Temperatura	Salinidad		Plantas
Solidos disueltos	Metales pesados		Virus
Sólidos en suspensión	Detergentes		
	Compuestos tóxicos		
	Pesticidas		

Fuente: (Chulluncuy Camacho, 2011)

Este proceso se lleva a cabo mediante técnicas fisicoquímicas ya establecidas y estudiadas que haciendo uso de sustancias químicas denominadas floculantes que se mezclan con el agua y pasan a través de una serie de unidades o compartimientos eliminan todas aquellas sustancias que pueden perjudicar la salud humana.

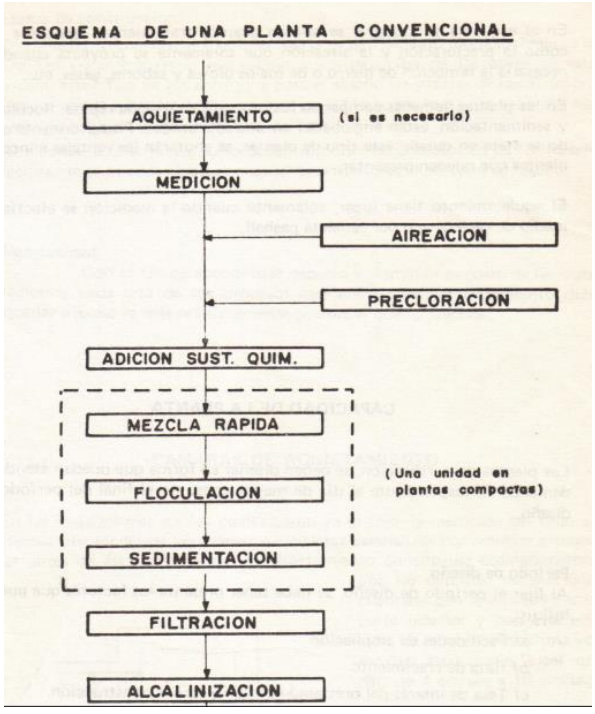


Ilustración 3. Esquema general de un proceso de potabilización de aguas. (Silva Garavito)

2.2.1. Normatividad sobre potabilización del agua

Colombia es un país con una amplia diversidad ecológica que le otorga una gran cantidad de recursos incluyendo una vasta red de ríos, lagos que lo posicionan como uno de los países con mayor cantidad de este recurso, según (Banco Mundial, 2015) en el listado de los países que cuentan con la mayor cantidad de agua, tres países latinoamericanos están entre los 10 primeros: Brasil (primer sitio), Colombia (tercero) y Perú (octavo).

Es por esto que dentro de la legislación colombiana en todos sus niveles se han decretados una serie de normas para el cuidado, mantenimiento y sostenibilidad futura del recurso hídrico colombiano.

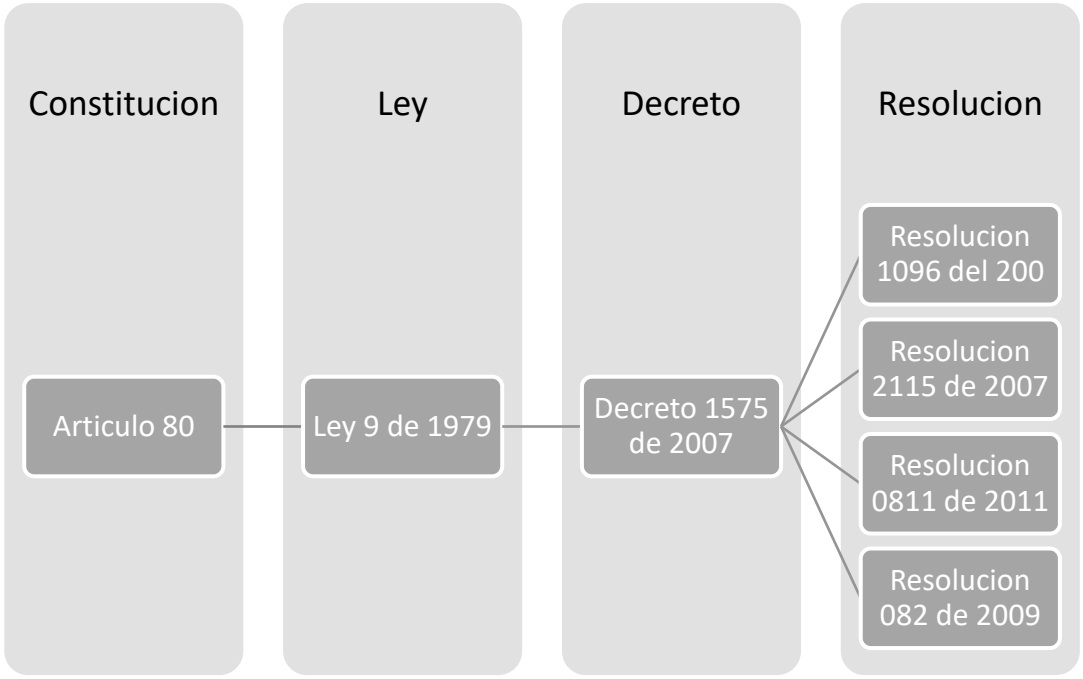


Ilustración 4. Sistema Normativo Colombiano sobre el uso del agua

2.2.2. Características fisicoquímicas y microbiológicas del agua

Las características del agua son aquellos elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos que pueden tener alguna incidencia en la salud humana causando desde leves trastornos estomacales hasta enfermedades crónicas como el cáncer si estas sustancias se

encuentras en dosis altas es por esto que son reguladas por organismos de control mediante estudios químicos que miden la concentración de dichos compuestos.

La resolución 2115 de 2007 Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano establece en su capítulo II LAS Características Físicas y Químicas del agua para consumo humano.

Artículo 2°. Características Físicas. El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

Tabla 2. Valores máximos aceptables para las características físicas presentes en el agua

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelometrías de turbiedad (UNT)	2

Fuente: (MINISTERIO DE LA PROTECCiÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007)

Artículo 5°. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN RECONOCIDO EFECTO ADVERSO EN LA SALUD HUMANA. Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación:

Tabla 3. Valores máximos aceptables para las características químicas presentes en el agua

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias.	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7

Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

Fuente: (MINISTERIO DE LA PROTECCiÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007)

Artículo 6°. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA. Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana se señalan en el siguiente cuadro:

Tabla 4. Valores máximos aceptables para las características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobe la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO_2	0,1
Nitratos	NO_3	10
Fluoruros	F	1,0

Fuente: (MINISTERIO DE LA PROTECCiÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007)

Artículo 7°. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS QUE TIENEN CONSECUENCIAS ECONÓMICAS E INDIRECTAS SOBRE LA SALUD HUMANA. Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos y compuestos químicos que tienen consecuencias económicas e indirectas sobre la salud se señalan a continuación:

Tabla 5. valores máximos aceptables para las características químicas que tienen mayores consecuencias sobre la salud humana

Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico	Expresadas como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Calcio	Ca	60
Alcalinidad Total	$CaCO_3$	200
Cloruros	Cl	250
Aluminio	Al	0,2
Dureza Total	$CaCO_3$	300
Hierro Total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO_4^2	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	Po_4^3	0,5

Fuente: (MINISTERIO DE LA PROTECCiÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007)

Las características microbiológicas del agua son aquellas relacionadas con cualquier microorganismo patológico que puede causar efectos en la salud humana, estas están descritas en el capítulo III de la resolución 2115 de 2007.

Artículo 11 °. CARACTERÍSTICAS MICROBIOLÓGICAS. Las características microbiológicas del agua para consumo humano deben enmarcarse dentro de los siguientes valores máximos aceptables desde el punto de vista microbiológico, los cuales son establecidos teniendo en cuenta los límites de confianza del 95% y para técnicas con habilidad de detección desde 1 Unidad Formadora de Colonia (UFC) o 1 microorganismo en 100 cm3 de muestra:

Tabla 6. Valores máximos establecidos para características microbiólogas del agua potable

Técnicas utilizadas	Coliformes totales	Escherichia coli
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm^3	0 UFC/100 cm^3
Enzima Sustrato	<de 1 microorganismo en 100 cm^3	<de 1 microorganismo en 100 cm^3
Sustrato Definido	0 microorganismos en 100 cm^3	0 microorganismos en 100 cm^3
Presencia-Ausencia	Ausencia en 100 cm^3	Ausencia en 100 cm^3

Fuente: (MINISTERIO DE LA PROTECCiÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, 2007)

2.2.3. Coagulación

La coagulación es un proceso químico que consiste en la adición de sustancias que se mezclan en el agua a una concentración determinada dando como resultado una mezcla agua-coagulante que permite la eliminación de las sustancias en suspensión que por su diminuto tamaño no sedimentan en el tiempo.

Según (Lorenzo-Acosta, 2006) en el proceso de tratamiento del agua, la coagulación la definimos como el resultado de la acción electroquímica producida en el agua por la adición de los coagulantes químicos, con lo cual se reducen las cargas eléctricas superficiales de las partículas coloidales, a la vez que se forman hidróxidos complejos.

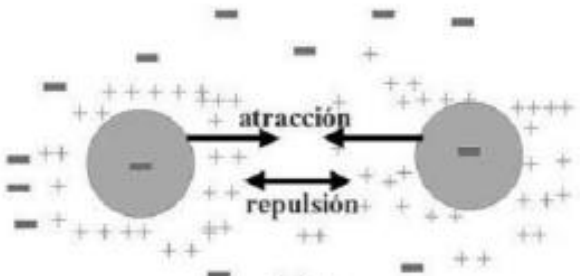


Ilustración 5. Proceso de unión de las coloides en la floculación. (Lorenzo-Acosta, 2006)

La determinación de la dosis a usar y el tipo de coagulante para la obtención de los mejores resultados en la eliminación de las sustancias en suspensión del agua está relacionada con las características fisicoquímicas del agua y se determina mediante pruebas de laboratorio haciendo uso del ensayo de jarras. El ensayo de Jar test se realiza con un agitador múltiple en seis vasos de precipitados de 1 litro en los que se dosifican los reactivos a ensayar. El equipo dispone de control de velocidad, lo que permite realizar la agitación rápida, lenta y decantación en el propio recipiente. Una vez decantada la muestra se succiona parte del sobrenadante para realizar los análisis. (Cabrera Bermúdez, Fleites Ramírez, & Contreras Moya, 2009)

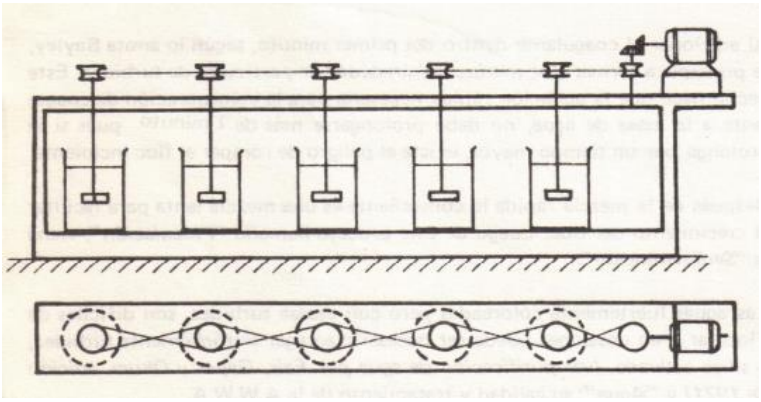


Ilustración 6. Esquema del ensayo de jarras a escala de laboratorio. (Silva Garavito)

Las sustancias coagulantes que se utilizan en el proceso de potabilización varían en composición y disposición siendo liquidas o sólidas, algunas de las más comunes por su precio y disponibilidad son el sulfato de aluminio, sulfato férrico, aunque existen otros conformados por polímeros como el Polihidróxido Cloruro de Aluminio (PAC) o de origen natural que en estudios de laboratorio han demostrado propiedades coagulantes como celulosa, las semillas de moringa.

Tabla 7. ventajas y desventajas del sulfato de aluminio como coagulante.

Sulfato de Aluminio	
Ventajas	Desventajas
• Es el coagulante más usado, y domina el mercado. • Bajo costo. • Manejo sencillo por parte del personal, puesto que no requiere de cuidados especiales para su uso. • No se modifica químicamente en el tiempo.	• Si no se controla adecuadamente la dosificación, la concentración de aluminio residual puede exceder los límites máximos permisibles establecidos para la calidad del agua potable (0,2 mg/l). • Dependiendo de la características del agua cruda, puede disminuir su eficiencia, por lo que requiere de un ayudante de coagulación, lo que implica un mayor costo.

Fuente: *(Chulluncuy Camacho, 2011)*

Tabla 8. ventajas y desventajas del sulfato férrico como coagulante.

Sulfato férrico	
Ventajas	Desventajas
• No produce aluminio residual. • En algunos casos, produce un floc más pesado y de mayor velocidad de asentamiento que el sulfato de aluminio. • Puede trabajar con un rango de pH amplio.	• Su costo es más elevado en comparación con el sulfato de aluminio. • Puede producir color en el agua.

Fuente: (Chulluncuy Camacho, 2011)

La adición de los compuestos químicos coagulantes se realiza en las plantas de tratamiento de agua potable mediante dosificadores que garantizan un caudal constante de dicho compuesto y generalmente distribuyen el coagulante a una unidades llamadas mezcladores rápidos que están diseñadas para generar una zona de mezcla con un gradiente alto y un tiempo de mezcla instantáneo para garantizar la homogeneidad de la mezcla agua-coagulante en la concentración optima determinada en el ensayo de jarras.

(Rojas, 1999) en su libro potabilización del agua 3ra edición indica que la mezcla rápida puede efectuarse mediante turbulencia, provocada por medios hidráulicos o mecánicos, tales como: resaltos hidráulicos en Canales, canaletas Parshall, vertederos rectangulares, tuberías de succión de bombas, mezcladores mecánicos en línea, rejillas difusoras, chorros químicos y tanques con equipos de mezcla rápida.

Mezcladores rápidos mecánicos

Los mezcladores rápidos mecánicos son estructuras que como su nombre indica poseen dentro de su funcionamiento un elemento mecánico (motor) cuya principal función es la de hacer girar un eje con paletas o hélices que se encarga de inducir a través de estas un movimiento en el fluido para alcanzar un gradiente que permita al floculante mezclarse homogénea e instantáneamente con el agua a tratar.

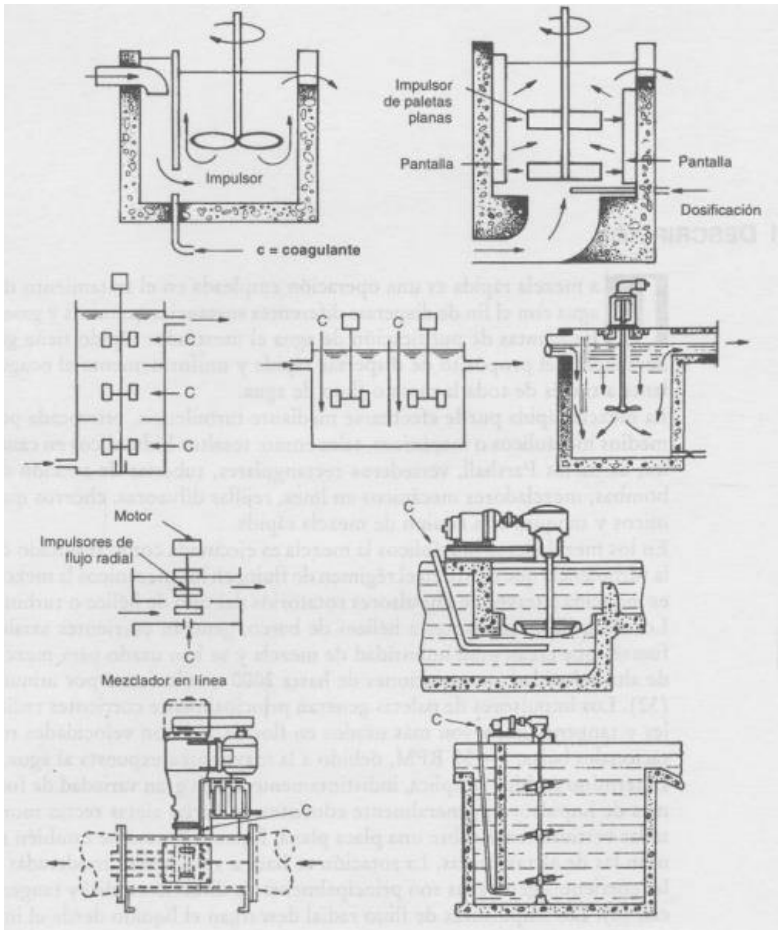


Ilustración 7. Diversos tipos de Mezcladores mecánicos. (Rojas, 1999)

Los tanques pueden diseñarse con sección circular o cuadrada. El mezclador mecánico empleado puede ser del tipo hélices, paletas, turbinas u otros elementos similares acoplados a un eje de rotación impulsado por una fuerza motriz. Los ejes deben girar a un número elevado de revoluciones para agitar el agua en forma violenta y facilitar el mezclado rápido y uniforme con el coagulante. La entrada del agua debe ser por la parte inferior del tanque y la salida por la parte superior para que la mezcla sea completa. Debe diseñarse una pantalla, a la entrada del mezclador, para facilitar el ingreso del flujo por la parte inferior. El mezclador debe tener desagües para la limpieza. Para el correcto funcionamiento de los mezcladores mecánicos debe tenerse en cuenta que la potencia suministrada está en función del gradiente de velocidad medio requerido. (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000)

mezcladores rápidos hidráulicos

Los mezcladores rápidos hidráulicos son estructuras de mezclado rápido que a diferencia de los mecánicos su funcionamiento se basa en la generación de un resalto hidráulico que produzca la suficiente turbulencia en una sección particular del mismo para efectuar la mezcla instantánea del coagulante.

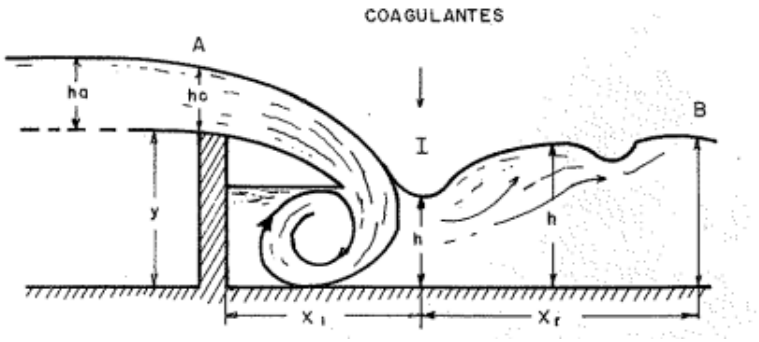


Ilustración 8. Vertedero como mezclador. (Valencia, 2000)

Los mezcladores hidráulicos pueden emplearse cuando se dispone de suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada. El resalto debe producirse en la garganta, por lo que el dispositivo debe diseñarse para garantizar esta condición. Tienen la ventaja de no requerir equipo mecánico. (Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000)

La principal observación formulada, con respecto al diseño de mezcla rápida, radica en la importancia de dispersar uniformemente el coagulante en el agua cruda de manera que se evite el subtratamiento o el sobretratamiento. El tiempo y el grado de mezcla han sido considerados como los factores más importantes en el diseño, sin embargo, consideraciones adicionales sobre el mecanismo de la coagulación y la cinética de las reacciones de coagulación son también necesarias. (Rojas, 1999)

Vertederos

Los vertederos pueden también usarse tanto para medir el caudal como para producir mezcla rápida debido a la turbulencia del resalto hidráulico que la lámina de agua produce en el punto de impacto. El análisis hidráulico de los vertederos puede hacerse en forma similar al realizado para la canaleta Parshall. (Valencia, 2000)

mezclador rápido Parshall

La canaleta Parshall es un dispositivo hidráulico diseñado por el ingeniero Ralph Parshall (1881-1959) cuya principal función es la de medir caudales mediante una serie de relaciones y equivalencias, la canaleta Parshall cuenta con 4 partes o sección las cuales son:

1. Sección de entrada
2. Sección convergente
3. La garganta
4. Sección divergente

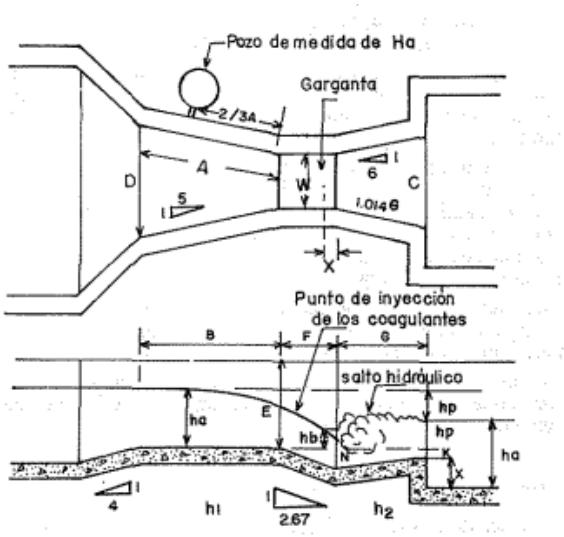


Ilustración 9. Esquema de una canaleta Parshall. (Valencia, 2000)

La canaleta Parshall es la forma más común de producir un resalto hidráulico. Consiste en un segmento de canal con cambio rápido de pendientes y constricción en el punto llamado garganta. Al comienzo de ella el agua pasa por la profundidad crítica (NF=1) y debido al cambio de pendiente (2.67: 1) se acelera hasta crear un régimen supercrítico que se convierte en un salto hidráulico al encontrar la pendiente negativa de la sección G de salida en la que el régimen es subcrítico. Este salto hidráulico es el que se usa para la mezcla rápida. (Valencia, 2000)

Para lograr generar un resalto hidráulico que pueda actuar como mezclador dentro de la canaleta Parshall se debe tener una serie de requisitos cuyo objetivo es lograr el desarrollo adecuado del resalto hidráulico como lo menciona (Valencia, 2000) en su libro teoría y práctica de la purificación del agua estableciendo 3 requisitos.

- Que no trabaje ahogada, o sea que la relación Hb/Ha no exceda los siguientes valores:

Tabla 9. Valores de sumergencia en relación al ancho de la garganta en la canaleta

Ancho de garganta	Máxima sumergencia (Hb/Ha)
7.5 (3") a 22.9 (9")	0.6
30.5 (1') a 244 (8')	0.7
305 (10') a 1525 (50')	0.8

Fuente: (Valencia, 2000)

- Que la. relación Ha/W esté entre 0.4 y 0.8. La razón para esta condición es la de que la turbulencia del resalto no penetra en profundidad dentro de la masa de agua, dejando una capa, bajo el resalto, en que el flujo se transporta con un mínimo de agitación.

- Que el número de Fraude esté comprendido entre estos dos rangos 1.7 a 2.5 o 4.5 a 9.0. Debe evitarse números entre 2.5 y 4.5 que producen un resalto inestable el cual no permanece en su posición, sino que siempre está cambiando de sitio, lo que dificulta la aplicación de coagulantes.

2.2.4. Floculación

La floculación es el proceso continuo a la coagulación en la cual reduce la agitación del agua para permitir la formación de partículas de mayor tamaño denominadas floc que puedan sedimentar por efecto de la gravedad. El termino floculación se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculentas; es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de las partículas. (Rojas, 1999)

La formación de los flóculos es consecuencia de la agrupación de las partículas descargadas al ponerse en contacto unas con otras. Puede ser causada por la colisión entre las partículas, debido a que cuando se acercan lo suficiente las superficies sólidas, las fuerzas de Van der Waals predominan sobre las fuerzas de repulsión, por la repulsión, por la reducción de la carga eléctrica que trae como consecuencia la disminución de la repulsión eléctrica. (Lorenzo-Acosta, 2006)

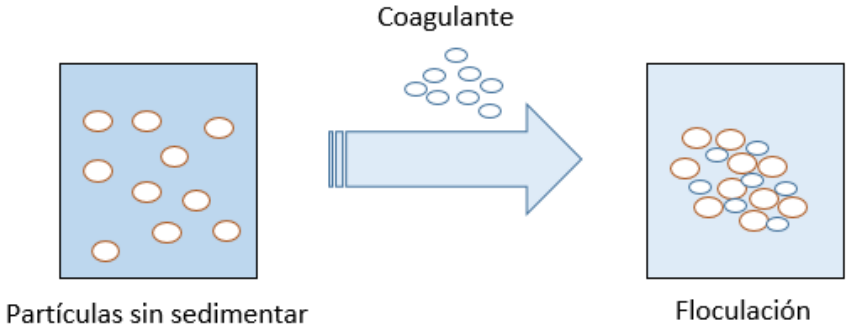


Ilustración 10. Mecanismo de la floculación

De la misma manera que la coagulación, la floculación es influenciada por fuerzas químicas y físicas tales como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración del floculo, el pH, la temperatura del agua y la concentración de los electrolitos. (Rojas, 1999)

Según el tipo de energía usada para producir la agitación, los floculadores pueden clasificarse en hidráulicos, mecánicos e hidromecánicos. Los primeros, según el sentido del flujo, se clasifican en: de flujo horizontal, de flujo vertical y de flujo helicoidal. Los segundos, asimismo, según el sentido del movimiento, se clasifican en reciprocantes y rotatorios. (Valencia, 2000)

floculadores mecánicos

En los floculadores mecánicos se introduce potencia al agua para asegurar una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos. El tipo de agitador mecánico más usado es el de paletas, ya sean de eje horizontal o vertical, las cuales imparten un movimiento rotatorio al agua, así como una cierta turbulencia interna. (Rojas, 1999)

En floculadores mecánicos se recomienda proveer por lo menos 3 compartimentos sucesivos, separados por pantallas difusoras permeables, para minimizar el cortocircuito. En plantas convencionales de filtración por arena se prefieren los floculadores mecánicos de eje horizontal. En plantas con filtros de alta tasa se prefieren los floculadores mecánicos de eje vertical, puesto que estos producen flóculo pequeño, pero resistentes a fuerzas cortantes. (Rojas, 1999)

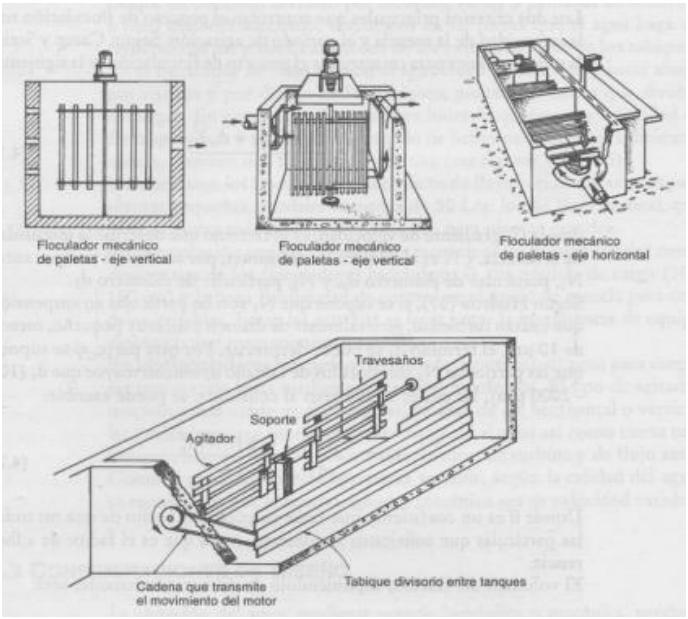


Ilustración 11. Tipos de floculadores mecánicos. (Rojas, 1999)

El principal defecto de los flocu1adores mecánicos son los cortocircuitos. La forma como se comunican las cámaras tiene marcada importancia en ello. Una estructura de interconexión que da buenos resultados es la pared con orificios. El gradiente a través del orificio debe ser < al gradiente de la cámara anterior. La velocidad a través del orificio debe ser > 0.30 m /s para que no sea posible que se creen corrientes en sentido contrario al flujo y se entremezclen las masas de agua de las cámaras. La velocidad a través del orificio debe hacerse menor de 0.75 m /s para que no se rompa el f1oc. (Parra, 1981)

floculadores hidráulicos

los floculadores hidráulicos más comunes son los de flujo horizontal y los de flujo vertical, en general, los floculadores hidráulicos, con una velocidad de flujo apropiada y un número adecuado de bafles para asegurar suficientes curvas, proveen una floculación efectiva. (Rojas, 1999)

Los floculadores hidráulicos derivan su energía para la agitación de la masa líquida, de la carga de velocidad que el flujo adquiere al escurrir por un conducto. Consisten en tanques provistos de pantallas entre los cuales el agua circula con una velocidad fija, produciendo cierta turbulencia en cada cambio de dirección del flujo. (Valencia, 2000)

Floculadores hidráulicos de flujo Horizontal. El floculador de flujo horizontal consiste en un tanque de concreto dividido por tabiques, bafles o pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuestos en tal forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de los tabiques. En la práctica, los floculadores hidráulicos de flujo horizontal se usan para plantas pequeñas, caudales menores de 50 L/s. (Rojas, 1999)

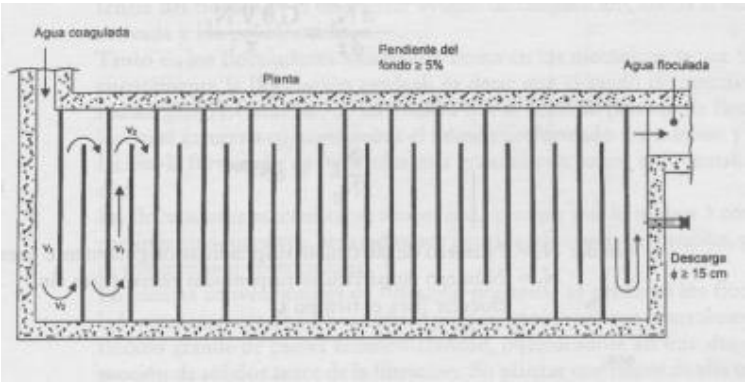


Ilustración 12. Floculador de flujo horizontal. (Rojas, 1999)

Floculadores hidráulicos de flujo vertical. Este tipo de floculador es más compacto que el de flujo horizontal, pues puede hacerse más profundo (2.0 a 3.0 m) y por tanto requieren menor área superficial. Su principal problema consiste en la acumulación de lodos en la parte inferior de los compartimientos, los cuales son difíciles de extraer. En los floculadores de flujo vertical el paso del t1ujo por arriba se determina considerándolo como un vertedero rectangular, de pared delgada,

lámina ahogada y sin contracciones laterales. El paso por abajo como un orificio abogado. A esto hay que agregarle las pérdidas por cambio de dirección del flujo. (Valencia, 2000)

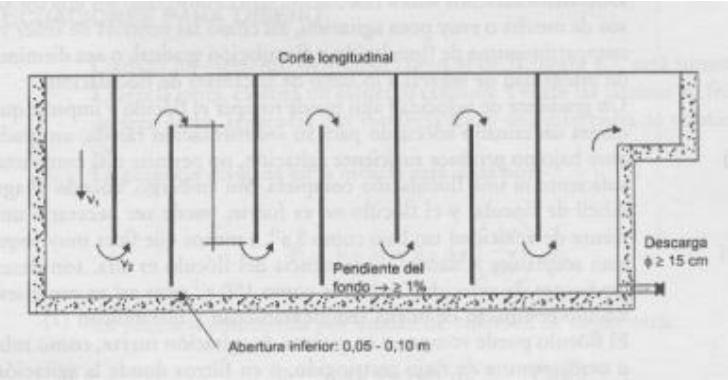


Ilustración 13. Floculador de flujo vertical. (Rojas, 1999)

floculador Alabama

los Alabama consisten en cámaras interconectadas, pero no mediante ventanas u orificios, sino mediante tuberías provistas de un codo y salida ascensional del agua, ubicadas en el fondo de cada cámara. Su principio de funcionamiento se basa en que la salida de un chorro ascendente del efluente de la cámara procedente ocasiona la mezcla del agua en la cámara actual y la consecuente aglomeración del floc. Estos floculadores, al igual que los COX, pueden considerarse una variante del floculador hidráulico de tabiques de flujo vertical. (Rivas & Bravo, 2015)

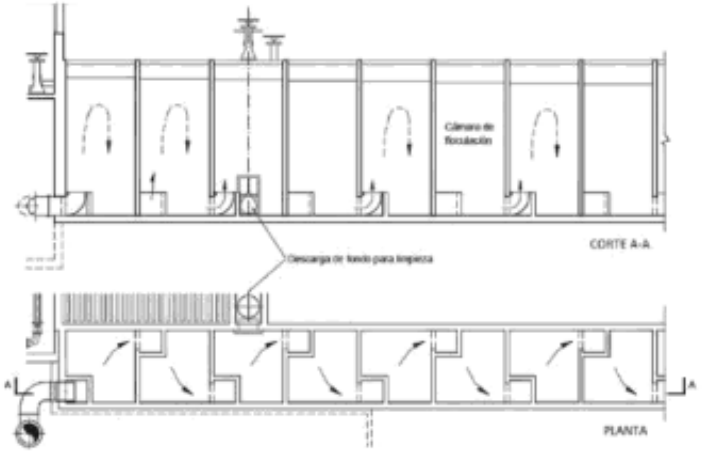


Ilustración 14. Floculador de tipo Alabama. (Rivas & Bravo, 2015)

Estos floculadores fueron desarrollados en Alabama, Estados Unidos y se han usado mucho, especialmente en Brasil, desde los años 1950. En el resto de países latinoamericanos han tenido mucha acogida, quizá, por su sencillez en el cálculo y la simpleza en el diseño y construcción. (Rivas & Bravo, 2015)

Deben hacerse un mínimo de nueve cámaras, pero es preferible hacer doce b más cuyo volumen sumado corresponda al volumen del tiempo de detención total que se necesite. En los codos la velocidad debe estar entre 0.40 y 0.20 mis. para evitar rotura del floc. En el extremo de los codos se coloca una platina de orificio que pueda ser cambiado por otra a voluntad a fin de modificar el gradiente. (Valencia, 2000)

floculador cox

Este floculador fue ideado por el ingeniero Charles R. Cox para ser empleados en los servicios de salud pública de Brasil y se construyó por primera vez en la ciudad de Pirapora (Minas Gerais), en la década de 1960. Este mezclador tiene varias cámaras de sección cuadrada (horizontal) ubicadas en serie, por donde el agua ingresa a través de una o dos ventanas rectangulares, ubicadas en las esquinas inferiores de una de sus caras, para que, luego de ascender, abandone la cámara por otra ventana (o dos) ubicada(s) en las esquinas superiores de la cara opuesta, ingresando a la siguiente cámara. De esta manera se tendrá, en forma alterna, una cámara de flujo ascendente, la siguiente descendente y así sucesivamente. (Rivas & Bravo, 2015)

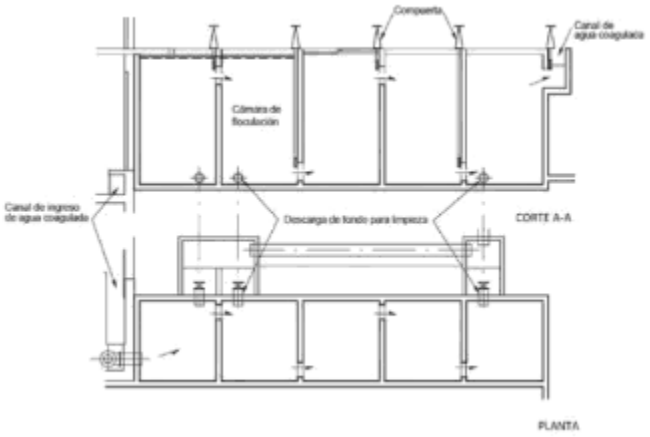


Ilustración 15. Floculador de tipo COX. (Rivas & Bravo, 2015)

Los floculadores de flujo helicoidal consisten en una serie de cámaras (más de seis y preferiblemente ocho a doce) en las cuales el agua entra por el fondo en la esquina de la celda y sale por encima en la esquina opuesta, de forma que se induce un movimiento rotacional del agua que crea un vórtice amplio, cuyo centro se desplaza frecuentemente de un lugar a otro propiciando así el desarrollo de vórtices menores. Este tipo de floculador es de utilidad en los casos en que se requiera bajo gradiente de velocidad, pero las turbiedades sean moderadas y no contengan partículas pesadas. La colocación de las aberturas en las cámaras debe hacerse en forma cuidadosa para que el agua adquiera el movimiento rotatorio que se busca. (Valencia, 2000)

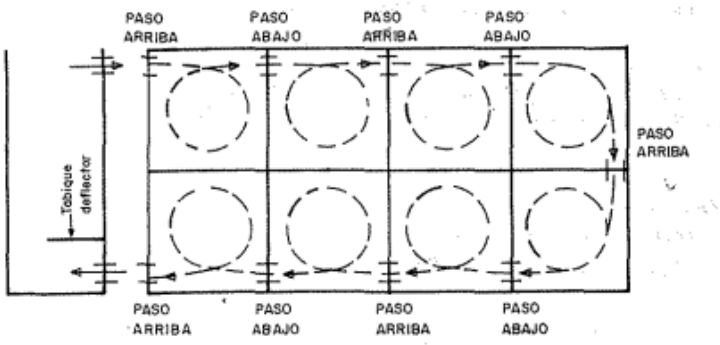


Ilustración 16. Esquema del movimiento del agua en un floculador COX. (Valencia, 2000)

2.2.5. Sedimentación

Es el proceso físico mediante el cual las partículas en suspensión presentes en el agua son removidas o separadas del fluido, debido al efecto de la gravedad. Dichas partículas deberán ser más densas que el agua, y el resultado que se obtenga será un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. (Chulluncuy Camacho, 2011)

La sedimentación realiza la separación de los sólidos más densos que el agua y que tiene una velocidad de caída tal que pueden llegar al fondo del tanque sedimentador en un tiempo económicamente aceptable. Hasta qué límite de turbiedad debe remover la sedimentación y qué turbiedad debe entrar al filtro, es asunto de debate. Todo depende del trabajo que se quiera dar a cada proceso. Según el tipo de filtro que se use, puede ser más económico remover la mayor cantidad de sólidos en la sedimentación y sólo una mí mina parte en la filtración, o remover, en

cambio, un porcentaje de sólidos relativamente bajo en la sedimentación (disminuyendo el tamaño de los tanques) y dejando el resto del trabajo a la filtración. (Valencia, 2000)

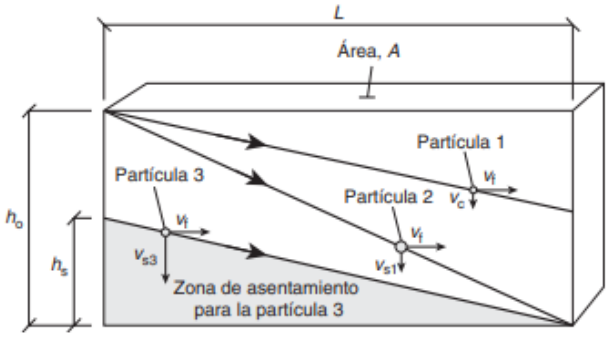


Ilustración 17. Trayectoria de partículas discretas en una cuenca de sedimentación. (James R. Mihelcic, 2011)

Las partículas con densidades más grandes de 1 000 kg/m3 se asentarán finalmente, y las partículas con densidades menores a 1 000 kg/m3 flotarán hacia la superficie del agua. En el tratamiento de aguas existen tipos comunes de asentamiento: el asentamiento discreto de partículas y el asentamiento floculante. (James R. Mihelcic, 2011)

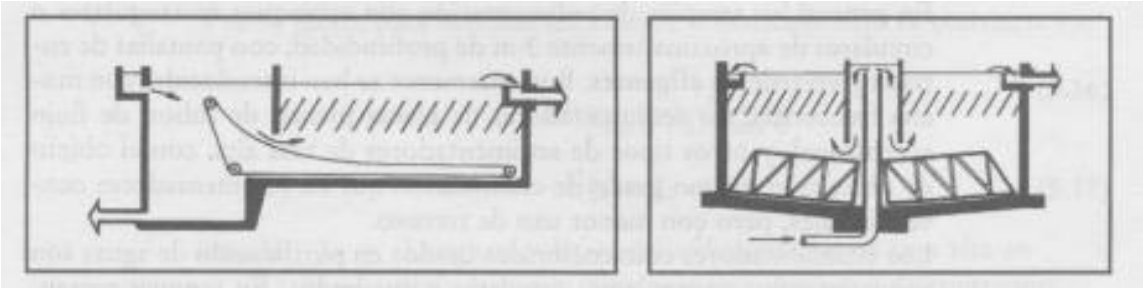


Ilustración 18. Ejemplos de sedimentadores; imagen izquierda un sedimentador rectangular; imagen derecha un sedimentador circular. (Rojas, 1999)

2.2.6. Filtración

Es un proceso que consiste en la separación de partículas y pequeñas cantidades de microorganismos (bacterias, virus) a través de un medio poroso. Es la fase responsable de que se

cumplan los estándares de calidad para el agua potable. Desde el punto bacteriológico, los filtros tienen una eficiencia de remoción superior a 99%. (Chulluncuy Camacho, 2011)

La Filtración es el método más común para remover partículas pequeñas transportando el agua a través de material poroso. Por ejemplo, cuando el agua pasa a través de lechos de arena, las partículas son retenidas en los espacios que hay entre los granos o en la superficie de los mismos en el proceso llamado adsorción. Las partículas se detienen en la superficie de los granos y éstas son retenidas por las fuerzas de adsorción. De esta manera la filtración ayuda a controlar la contaminación biológica y la turbiedad, que es la medida de la opacidad del agua causada por materia suspendida y que reduce la efectividad de los compuestos para su desinfección. (Salamanca, 2016)

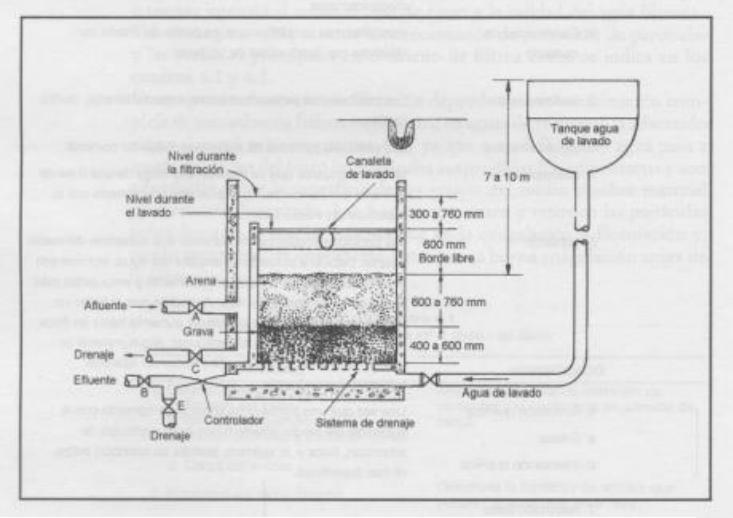


Ilustración 19. Esquema de filtro con tanque elevado para lavado. (Rojas, 1999)

Las tecnologías de filtración comúnmente utilizadas para el tratamiento de aguas son la filtración lenta a rápida en lechos de arena, sistemas de empaque para filtración. Los sistemas rápidos o lentos se refieren a la cantidad de flujo por unidad de área. Los filtros se clasifican en función del material granular utilizado, como carbón-antracita o arena-carbón; en función de si son filtros por gravedad o por presión. Los sistemas de filtración se clasifican por la dirección del flujo de agua a través del filtro, en flujo ascendente y descendente. (Salamanca, 2016)

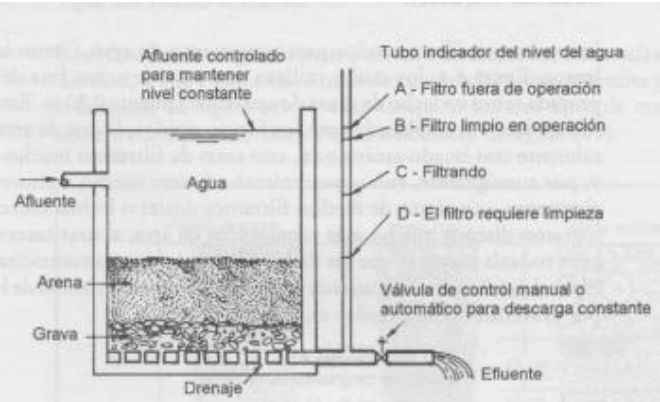


Ilustración 20. Esquema de un filtro de arena lento. (Rojas, 1999)

2.2.7. Desinfección

La desinfección del agua consiste en la exterminación de las bacterias patógenas que pueda contener. En el proceso, se destruirán también los colibacilos y se reducirá considerablemente la cantidad de otras bacterias. Sin embargo, no se obtendrá ordinariamente la esterilización completa, aunque ni siquiera es necesaria. El cloro, en sus diversas formas, se emplea casi universalmente como agente desinfectante del agua. Es barato, seguro, y su manejo no presenta gran dificultad.

(James R. Mihelcic, 2011) explica que los patógenos pueden ser removidos por procesos de tratamiento como la filtración granular o inactivados por agentes de desinfección. El término desinfección en la práctica de agua potable se refiere a dos actividades.

1. Desinfección primaria: la inactivación de microorganismos en el agua.

2. Desinfección secundaria: el mantenimiento de un residuo de desinfectante en el sistema de distribución de agua tratada (también llamada mantenimiento residual).

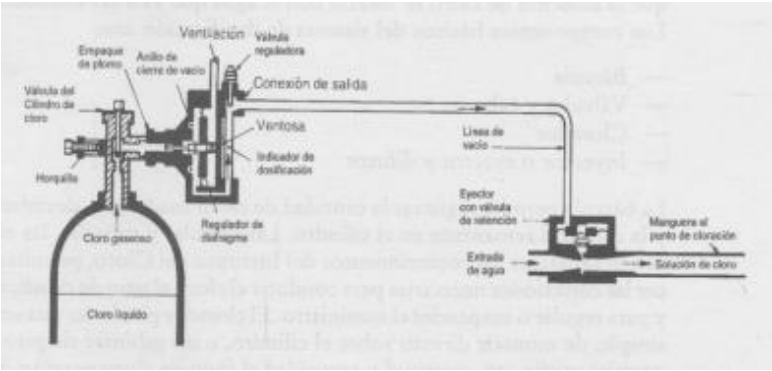


Ilustración 21. Sistema de dosificación de cloro para desinfección. (Rojas, 1999)

Desinfección con cloro

Es un proceso químico que mata organismos patógenos, existen dos tipos de desinfección por cloro: la primaria, donde se matan los organismos y la secundaria que mantiene un desinfectante residual para prevenir el crecimiento de más microorganismos en el sistema de distribución de agua. (Salamanca, 2016)

Desinfección con Ozono

Es un gas tóxico que se puede obtener haciendo pasar el oxígeno que se encuentra en el aire a través de dos electrodos, es un compuesto inestable que puede ser generado en el mismo lugar donde se encuentra y tiene una baja solubilidad en el agua, por lo que se debe obtener la máxima eficiencia al estar en contacto con el líquido. (Salamanca, 2016)

Radiación ultravioleta

Es otro sistema utilizado y muy efectivo para eliminar las bacterias y virus, pero también necesita de un desinfectante secundario por las mismas razones que el ozono. La radiación ultravioleta es útil para sistemas pequeños de tratamiento de aguas porque tiene una disponibilidad inmediata, no produce residuos tóxicos, su tiempo para contacto es corto y su equipo es sencillo para operar y darle mantenimiento. (Salamanca, 2016)

2.3. Evaporación

2.3.1. Proceso de evaporación del agua

La evaporación es un proceso físico que ocurre de manera natural en el cual un líquido pasa a estado gaseoso como se consecuencia de la ganancia de energía de las moléculas de agua para que ocurra dicho cambio y según (Cardoso, 2015) la evaporación es el paso continuo de una sustancia del estado lıquido al de vapor, se efectúa en la superficie del lıquido y ocurre a cualquier temperatura hasta que se satura de vapor el espacio inmediato al lıquido.

El objetivo de la evaporación es concentrar una solución consistente en un soluto no volátil y un solvente volátil. En la mayor parte de las evaporaciones, el solvente es agua. La evaporación se realiza vaporizando una parte del solvente para producir una solución concentrada de licor espeso. (McCabe, Smith, & Harriott, 2007)

2.3.2. Tipos de evaporadores

Los evaporadores son equipos que funcionan bajo el principio de la evaporación al suministrar mediante un intercambiador de calor energía a una solución para evaporar una fracción de dicha solución y posteriormente condensar dicho vapor para un uso posterior, son altamente usados en las industrias químicas, alimenticias, industrias textiles.

Existen diferentes tipos de evaporadores con diferentes configuraciones, según (McCabe, Smith, & Harriott, 2007) existen 2 tipos principales de evaporadores tubulares, 1) los evaporadores de tubos largos verticales dentro de los cuales se diferencias los de flujo ascendente, los de flujo descendente y los de circulación forzada y 2) los evaporadores de película agitada.

No obstante, otras fuentes el número de tipos de evaporadores al vacío se incremente encontrando los siguientes:

Evaporador tipo batch: en la industria de alimentos es una bola (boule) con camisa de calefacción y agitador de paletas que barre la superficie caliente. Generalmente, el producto a concentrar tiene un tiempo de residencia largo, que puede afectar su operación. Para mejorar la eficiencia se utiliza en batería (2 a 3 unidades) conectado con un precalentador que es calentado con los vahos de cada bola. (Castro Montero, 1997)

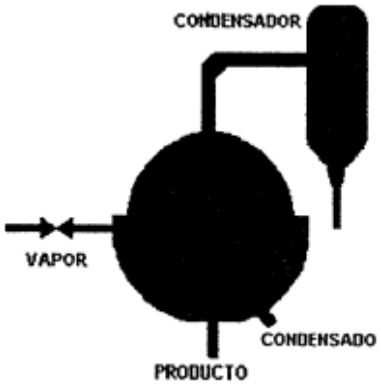


Ilustración 22. Evaporador tipo Batch. Fuente: (Castro Montero, 1997)

Evaporador de circulación natural: Se logra con un paquete corto de tubos que se puede calentar con una camisa que rodee el paquete de tubos o por un calentador externo. (Castro Montero, 1997)

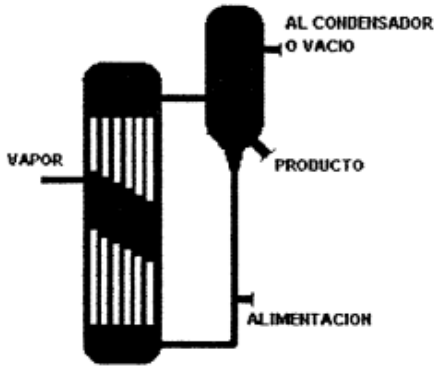


Ilustración 23. Evaporador de circulación natural. (Castro Montero, 1997)

Evaporador de película ascendente tubular: El líquido que asciende por el interior de los tubos es calentado por el vapor que está en la carcasa que rodea el haz de tubo. (Castro Montero, 1997)

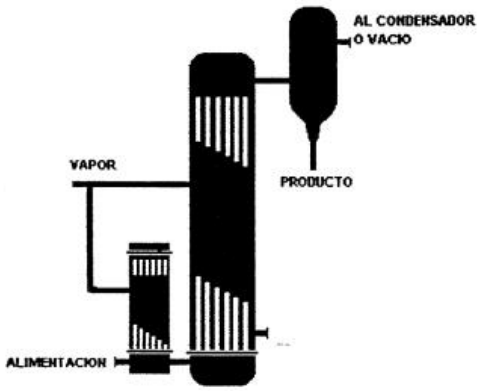


Ilustración 24. Evaporador de película ascendente. (Castro Montero, 1997)

Evaporador de película descendente tubular: El líquido baja impulsado por la gravedad, esto da una película más delgada en la pared del tubo, mejorando el tiempo de residencia y el coeficiente de transmisión de calor. (Castro Montero, 1997)

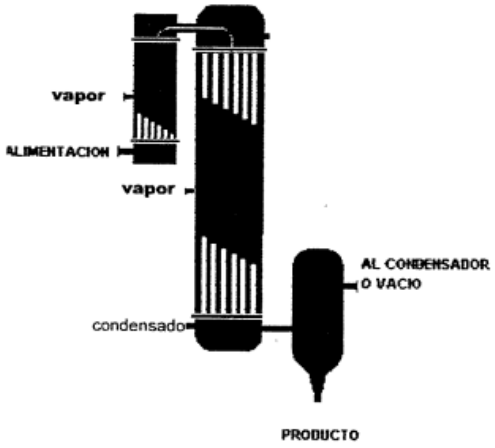


Ilustración 25. Evaporador de película descendente. (Castro Montero, 1997)

Evaporador de película ascendente-descendente tubular: este tipo de evaporador tiene la ventaja de la distribución de la alimentación en los tubos del de película ascendente con los requerimientos de más corta longitud del de película descendente. (Castro Montero, 1997)

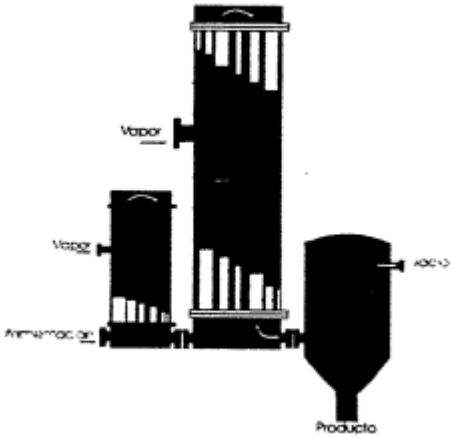


Ilustración 26. Evaporador de película ascendente y descendente. (Castro Montero, 1997)

Evaporador de circulación forzada: este tipo de evaporador es esencial para concentrar productos que puedan formar depósitos o cristales. El líquido circula a tan alta velocidad a en la calandria de calefacción que la presión generada impide su ebullición hasta que no llegue al separador donde al bajar la presión se produce un flash. (Castro Montero, 1997)

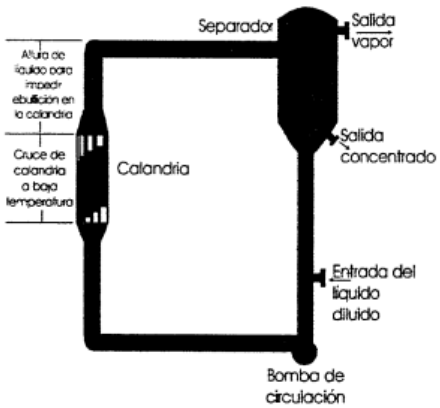


Ilustración 27. evaporador de circulación forzada. (Castro Montero, 1997)

Evaporador de película barrida: este evaporador se presta para trabajar con fluidos altamente viscosos. La alimentación entra por la parte superior y es distribuida sobre la superficie caliente por las paletas del eje. Por la parte inferior del evaporador sale el fluido caliente al separador donde se separan los vahos del concentrado. (Castro Montero, 1997)

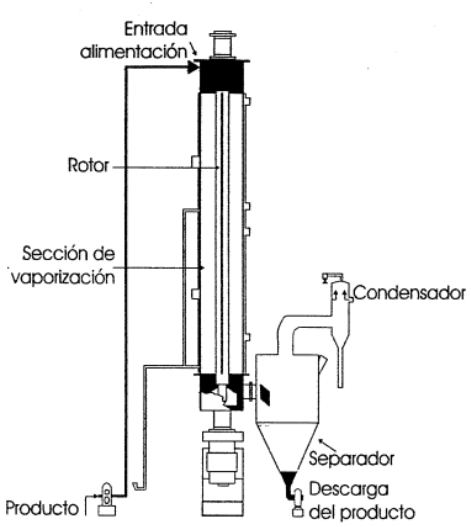


Ilustración 28. Evaporador de película barrida.
(Castro Montero, 1997)

2.3.3. Evaporación al vacío

La evaporación al vacío es un método para evaporar el solvente de una solución siendo comúnmente este el agua, su funcionamiento es similar a los evaporadores, pero con la diferencia de que en este proceso se busca reducir la presión por debajo de la atmosférica para de esta manera evaporar el agua a una menor temperatura.

La reducción de la presión en estos dispositivos presenta una serie de beneficios en comparación con la evaporación a presión normal como lo establece (Gomez & Botia, 2019) en donde expresa que para facilitar la reducción de las impurezas en el agua residual se pueden emplear sistemas generadores de vacío, de modo que se someta el agua a presiones inferiores a la atmosférica, disminuyendo de esta manera la temperatura de ebullición de los líquidos y también aumentando la eficiencia del fenómeno de transferencia de calor en el sistema.

Este de tipo de evaporadores son altamente eficientes para el tratamiento de una gran variedad de soluciones y ampliamente utilizados en la industria química, alimenticia y el tratamiento de aguas residuales industriales presentando una serie de ventajas frente a métodos convencionales al presentar una alta calidad de destilados con eficiencia superiores al 90% en la recuperación del agua de la solución tratada, un bajo consumo de energía, fácil uso, diseño flexible y de poco mantenimiento.

Dentro de los evaporadores al vacío existen diferentes tipos dentro de los cuales podemos encontrar:

- Los evaporadores al vacío por bomba de calor
- Los evaporadores al vacío por compresión mecánica de vapor
- Evaporadores al vacío de circulación natural
- Evaporadores al vacío de circulación forzada
- Evaporadores al vacío de múltiple etapa

2.3.4. Funcionamiento de la evaporación al vacío

El funcionamiento de estos equipos se basa el aprovechamiento de las propiedades termodinámicas de los fluidos en los cambios de fase por la cual un fluido puede presentar un cambio de fase en condiciones de presión y temperatura dadas, estas temperaturas y presiones a la cual un fluido cambia de fase se denominan temperatura de saturación T_{sat} y presión de saturación P_{sat}.

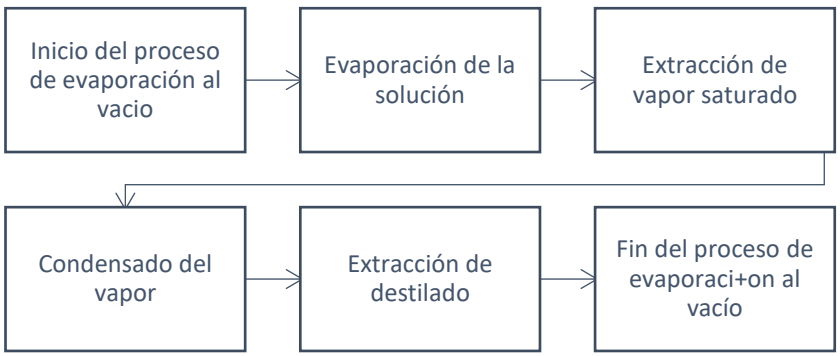


Ilustración 29. Proceso general de operación de un evaporador al vacío

Temperatura y presión de saturación

La temperatura de saturación es definida por (Cengel & Boles, 2012) como la temperatura a la que una sustancia pura cambia de fase y la presión de saturación es definida como como la presión a la que una sustancia pura cambia de fase, para el agua a una presión de 101.42 kPa la temperatura de ebullición será de 100°C mientras que a una presión de 12.35 kPa la temperatura de ebullición será de 50°C como se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de la presión de saturación del agua a diferentes temperaturas

Temperatura, T, °C	Presión de saturación, P_{sat}, kPa
-10	0.26
-5	0.40
0	0.61
5	0.87
10	1.23
15	1.71
20	2.34
25	3.17
30	4.25
40	7.39
50	12.35
100	101.4
150	476.2
200	1555
250	3976
300	8588

Fuente: (Cengel & Boles, 2012)

Como consecuencia de este comportamiento es posible diseñar y operar los evaporadores al vacío en un amplio rango de temperaturas de saturación controlando la presión dentro del evaporador, así pues, en un evaporador al vacío se deberá controlar la presión de trabajo y mantenerla en el valor para alcanzar la temperatura de saturación que se requiera.

Haciendo uso de los diagramas T-v o P-v se pude determinar el estado al que se encontrara una sustancia pura dadas unas condiciones de temperatura o presión, en la Ilustración 32 se observa el diagrama T-v donde se observan las regiones de líquido comprimido, mezcla saturada y vapor sobrecalentado.

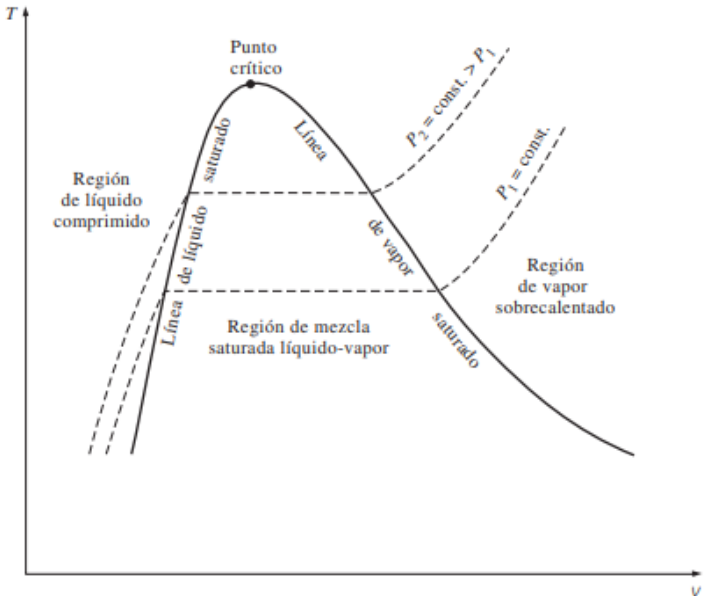


Ilustración 30. Diagrama de Temperatura Vs volumen especifico de una sustancia pura. (Cengel & Boles, 2012)

Proceso de transferencia de calor

Otro de los aspectos a tener en cuenta en el funcionamiento de los evaporadores al vacío son los mecanismos de transferencia de calor puesto que al inicio del proceso se necesitará suministrar calor hasta alcanzar la temperatura de saturación para evaporar el agua, además luego de extraído el vapor generado en el evaporador al vacío este deberá ser recondenado nuevamente para obtener el destilado para ello se deberá enfriar el vapor mediante un sistema de refrigeración.

En general, el calor lo puede recibir un cuerpo por intercambio con otro, ° lo puede generar por diferentes fenómenos, o combinación de ambos. Uno de los enunciados de la 2" Ley de la Termodinámica asegura que el calor se transmite espontáneamente de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura, a menos que exista un trabajo externo, hasta que la entropía es un máximo a energía total constante. (Cengel & Boles, 2012)

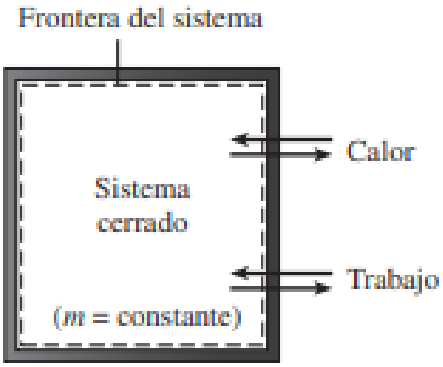


Ilustración 31. Transferencia de calor en un sistema cerrado. El calor y el Trabajo son 2 formas en las que la energía puede cruzar la frontera de un sistema. (Cengel & Boles, 2012)

En los procesos industriales, la energía en forma de calor se transfiere por medio de una variedad de métodos, que incluyen la conducción en calentadores de resistencia eléctrica; conducción-convección en intercambiadores de calor, calderas y condensadores; radiación en hornos y secadores de calor radiante, y por métodos especiales tales como calentamiento dieléctrico. (McCabe, Smith, & Harriott, 2007)

(Jaramilllo, 2007) indica que los intercambiadores de calor se presentan en una inimaginable variedad de formas y tamaños, la construcción de los intercambiadores está incluida en alguna de las dos siguientes categorías: carcaza y tubo o plato. Como en cualquier dispositivo mecánico, cada uno de estos presenta ventajas o desventajas en su aplicación.

Intercambiadores de carcaza y tubo: Este tipo de intercambiador consiste en un conjunto de tubos en un contenedor llamado carcaza. El flujo de fluido dentro de los tubos se le denomina comúnmente flujo interno y aquel que fluye en el interior del contenedor como fluido de carcaza o fluido externo. En los extremos de los tubos, el fluido interno es separado del fluido externo de la carcasa por la(s) placa(s) del tubo. Los tubos se sujetan o se sueldan a una placa para proporcionan un sello adecuado. (Jaramilllo, 2007)

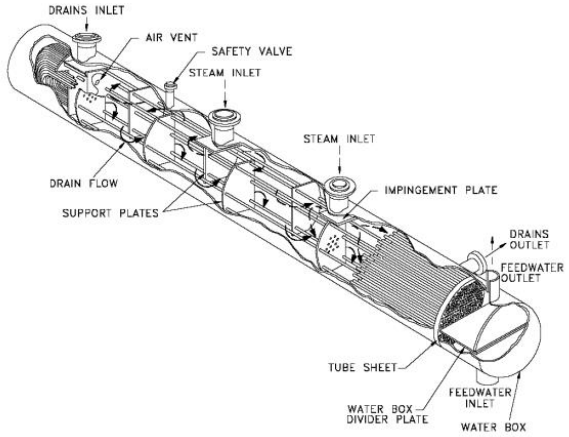


Ilustración 32. Intercambiador de calor de carcasa y tubos. (Jaramilllo, 2007)

Intercambiador de plato: El intercambiador de calor de tipo plato, consiste de placas en lugar de tubos para separar a los dos fluidos caliente y frío Los líquidos calientes y fríos se alternan entre cada uno de las placas y los bafles dirigen el flujo del líquido entre las placas. Ya que cada una de las placas tiene un área superficial muy grande, las placas proveen un área extremadamente grande de transferencia de térmica a cada uno de los líquidos. (Jaramilllo, 2007)

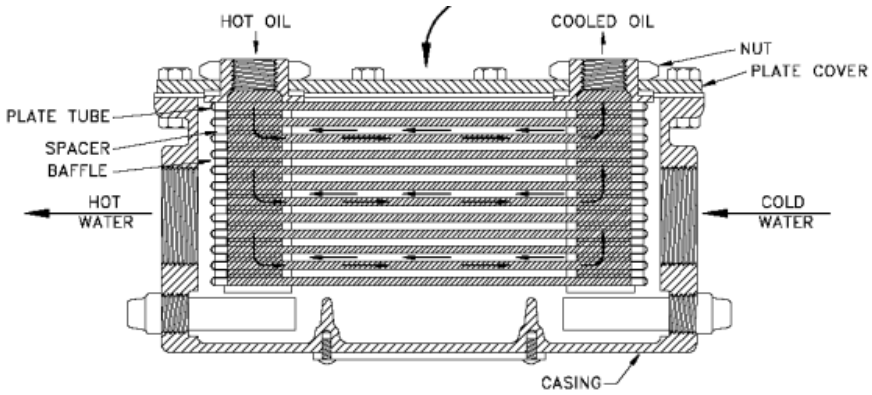


Ilustración 33. Intercambiador de calor tipo plato. (Jaramilllo, 2007)

Otros tipos de intercambiadores de calor son definidos según la dirección relativa entre los flujos del fluido que opera en ellos según (Jaramilllo, 2007) estos se encuentran en 3 principales categorías encontrando los intercambiadores de calor de flujo paralelo, de contraflujo y de flujo cruzado.

Intercambiadores de flujo paralelo: existe un flujo paralelo cuando el flujo interno o de los tubos y el flujo externo o de la carcasa ambos fluyen en la misma dirección. En este caso, los dos fluidos entran al intercambiador por el mismo extremo y estos presentan una diferencia de temperatura significativa. (Jaramilllo, 2007)

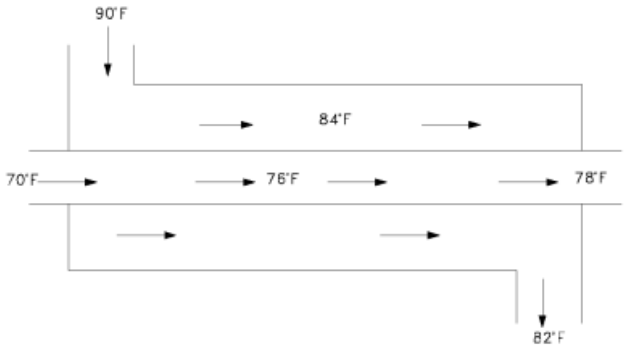


Ilustración 34. Esquema de un intercambiador de flujo paralelo. (Jaramilllo, 2007)

Intercambiadores de calor de contraflujo: se presenta un contraflujo cuando los dos fluidos fluyen en la misma dirección, pero en sentido opuesto. Cada uno de los fluidos entra al intercambiador por diferentes extremos Ya que el fluido con menor temperatura sale en contraflujo del intercambiador de calor en el extremo donde entra el fluido con mayor temperatura, la temperatura del fluido más frío se aproximará a la temperatura del fluido de entrada. (Jaramilllo, 2007)

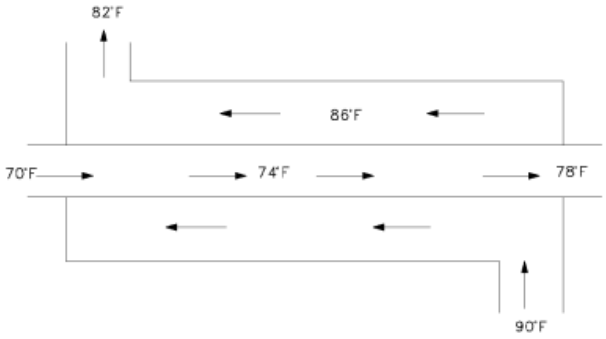


Ilustración 35. Intercambiador de calor tipo contraflujo.
(Jaramilllo, 2007)

Intercambiador de calor de flujo cruzado: el intercambiador de calor de flujo cruzado uno de los fluidos fluye de manera perpendicular al otro fluido, esto es, uno de los fluidos pasa a través de tubos mientras que el otro pasa alrededor de dichos tubos formando un ángulo de 90◦ Los intercambiadores de flujo cruzado son comúnmente usado donde uno de los fluidos presenta cambio de fase y por tanto se tiene un fluido pasado por el intercambiador en dos fases bifásico. (Jaramilllo, 2007)

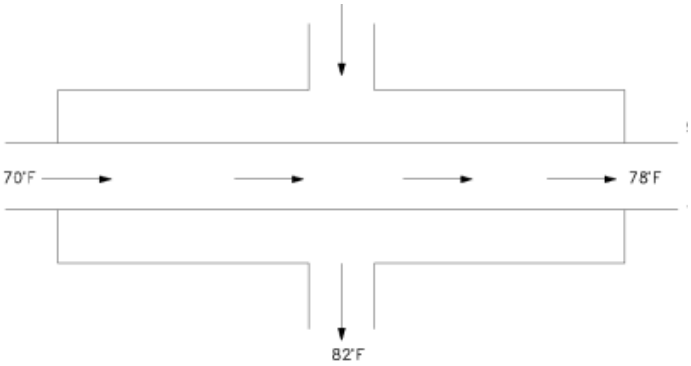


Ilustración 36. Intercambiador de calor de flujo cruzado.
(Jaramilllo, 2007)

2.4. Ecuaciones fundamentales

2.4.1. Balance de masa

Al igual que la energía, la masa es una propiedad conservada y que no puede crearse ni destruirse durante un proceso. Sin embargo, la masa m y la energía E se pueden convertir entre sí según una fórmula bien conocida que propuso Albert Einstein (1879-1955). (Cengel & Boles, 2012)

El principio de conservación de la masa para un volumen de control se puede expresar como: la transferencia neta de masa hacia o desde el volumen de control durante un intervalo de tiempo Δt es igual al cambio neto (incremento o disminución) en la masa total dentro del volumen de control durante Δt. (Cengel & Boles, 2012)

Según lo descrito por Cengel y Boles el balance de masas puede describirse como la siguiente expresión:

$$\begin{pmatrix} Masa\ total\ que\ entra \\ al\ VC\ durante\ \Delta t \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} Masa\ total\ que\ sale \\ del\ VC\ durante\ \Delta t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Cambio\ neto\ de\ masa \\ dentro\ del\ VC\ durante\ \Delta t \end{pmatrix}$$

O de forma más simplificada como

$$m_{entrada} - m_{salida} = \Delta m_{VC}$$

Donde: $\Delta m_{VC} = m_{final} - m_{inicial}$

Balance de masas para procesos de flujo estacionario

Durante un proceso de flujo estacionario, la cantidad total de masa contenida dentro de un volumen de control no cambia con el tiempo (m_{VC} = constante). Entonces el principio de conservación de la masa requiere que la cantidad total de masa que entra a un volumen de control sea igual a la cantidad total de masa que sale del mismo. (Cengel & Boles, 2012)

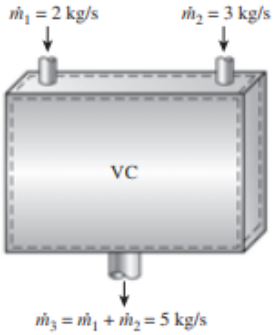


Ilustración 37. Principio de conservación de la masa en un volumen de control. (Cengel & Boles, 2012)

En este tipo de procesos la ecuación general del balance de masas cambia pues según (Cengel & Boles, 2012) El principio de conservación de la masa para un sistema general de flujo estacionario con entradas y salidas múltiples se puede expresar en forma de tasa como:

$$\sum_{entrada} \dot{m} = \sum_{salida} \dot{m}$$

Balance de masas para procesos de flujo no estacionario

Muchos procesos en los que se tiene interés tienen que ver con cambios dentro del volumen de control con tiempo. Esta clase de procesos se conocen como de flujo no estacionario o flujo transitorio. (Cengel & Boles, 2012)

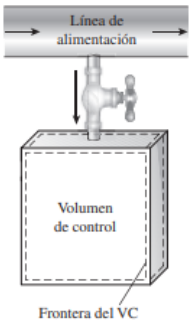


Ilustración 38. Esquema de un proceso de flujo no estacionario. (Cengel & Boles, 2012)

A diferencia de los procesos de flujo estacionario, los procesos de flujo no estacionario comienzan y terminan en algún tiempo finito en lugar de continuar indefinidamente. Por lo tanto, en esta sección se abordan los cambios que ocurren en algún intervalo de tiempo Δt en lugar de las tasas de cambios (cambios por unidad de tiempo). En algunos aspectos un sistema de flujo no estacionario es similar a un sistema cerrado, excepto porque la masa dentro de las fronteras del sistema no permanece constante durante un proceso. (Cengel & Boles, 2012)

Como en los sistemas de flujo no estacionarios la cantidad de masa que existe dentro del volumen de control no se mantiene constante, sino que cambia con el tiempo la ecuación para el balance de materia de este tipo de procesos se expresa como:

$$m_{entrada} - m_{salida} = (m_2 - m_1)_{VC}$$

2.4.2. Balance de energía

El balance de energía es una consideración física de todas las formas de energía que se desarrollan en un sistema bajo el principio de la primera ley de la termodinámica que indica que la energía no se crea ni se destruye, sino que se transforma.

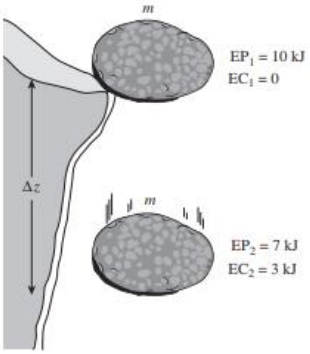


Ilustración 39. Esquema de la conservación de la energía que sufre un objeto al caer de cierta altura. (Cengel & Boles, 2012)

Según (Cengel & Boles, 2012) el principio de conservación de la energía se expresa como: el cambio neto (aumento o disminución) de la energía total del sistema durante un proceso es igual

a la diferencia entre la energía total que entra y la energía total que sale del sistema durante el proceso así pues esto se puede expresar como:

$$\binom{Energia\ total\ que}{entra\ al\ sistema} - \binom{energia\ total\ que}{sale\ del\ sistema} = \binom{Cambio\ en\ la\ energia}{total\ del\ sistema}$$

Expresada de forma simplificada

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}$$

Existen diversas formas en las que la energía puede manifestarse: energía térmica, mecánica, cinética, potencial, nuclear, eléctrica, química, magnética, la suma de estas formas de energía es lo que se denomina como energía total del sistema.

Energía cinética: Esta forma de energía está relacionado con el movimiento de los cuerpos y es expresado en forma matemática como $EC = m\frac{V^2}{2}$

Energía potencial: La energía potencial es toda aquella energía que posee un cuerpo en relación con una altura definida o nivel de referencia, se expresa matemáticamente como $EP = mgz$

Energía interna: Esta forma de energía es definida por (Cengel & Boles, 2012) como La suma de todas las formas microscópicas de energía y es denotada mediante el símbolo U

Los efectos magnéticos, eléctrico y de tensión superficial son significativos sólo en casos especiales y en general se ignoran. En ausencia de esta clase de efectos, la energía total de un sistema consta sólo de las energías cinética, potencial e interna, y se expresa como $E = U + EC + EP$. (Cengel & Boles, 2012)

Balance de energía para procesos de flujo estacionario

Un gran número de dispositivos de ingeniería como turbinas, compresores y toberas funcionan durante largos periodos bajo las mismas condiciones una vez completado el periodo de inicio transitorio y establecida la operación estacionaria; y se clasifican como dispositivos de flujo estacionario. (Cengel & Boles, 2012)

Durante un proceso de flujo estacionario, el contenido de energía total de un volumen de control permanece constante (E_{VC} = constante); por lo tanto, el cambio en la energía total del volumen de control es cero ($\Delta E_{VC} = 0$). En consecuencia, la cantidad de energía que entra a un volumen de control en todas las formas (calor, trabajo y masa) debe ser igual a la cantidad de energía que sale. (Cengel & Boles, 2012)

Así pues, el balance de energía para un proceso en flujo estacionario se puede expresar como

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = dE_{sistema}/dt = 0$$

O

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

Como la energía se puede transferir en forma de calor, trabajo y masa, la ecuación general del balance de energía para un proceso de flujo estacionario puede expresarse en función de estas como

$$\dot{Q}_{entrada} + \dot{W}_{entrada} + \sum_{entrada} \dot{m}\theta = \dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{salida} + \sum_{salida} \dot{m}\theta$$

Balance de energía para procesos de flujo no estacionario

Para un proceso de flujo no estacionario el contenido de masa y energía en el volumen de control no se mantiene constante durante todo el proceso así el balance de energía general para este tipo de procesos se expresa como

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = dE_{sistema}/dt$$

Donde el término del cambio de la energía que se produce durante un intervalo de tiempo será distinto de cero para un estado inicial y uno final durante dicho intervalo en consecuencia la ecuación anterior puede reescribirse como

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{sistema}$$

De forma explícita el balance de energía en flujo no estacionario será:

$$\left(Q_{entrada} + W_{entrada} + \sum_{entrada} m\theta\right) - \left(Q_{entrada} + W_{entrada} + \sum_{entrada} m\theta\right) = (m_2 e_2 - m_1 e_1)_{sistema}$$

3. METODOLOGIA

El desarrollo metodológico de la investigación se basó en 4 etapas principales de los pasos a seguir durante todo el proceso de investigación abarcando una etapa inicial de investigación hasta una etapa final de operación en el laboratorio del prototipo propuesto.

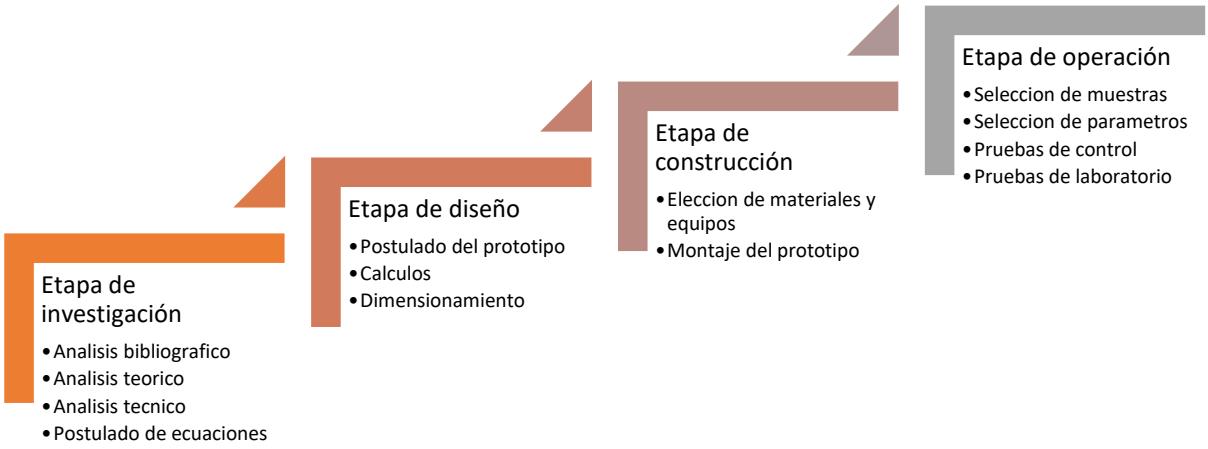


Ilustración 40. Marco metodológico de la investigación

Etapa de investigación

En esta etapa se realizó un análisis bibliográfico sobre la evaporación, los evaporadores al vacío, lo aspectos teóricos y técnicos para el desarrollo de un prototipo de evaporador al vacío a escala de laboratorio, estos análisis estuvieron basados principalmente en principios termodinámicos sobre el comportamiento de los fluidos a diferentes presiones y temperaturas además se realizó un análisis de cada de uno de las partes que componen el prototipo de evaporador al vacío basado en análisis de los balances de masa y energías para la obtención de las ecuaciones que permiten el dimensionamiento de cada una de las partes.

Etapa de diseño

En esta etapa se plantea el esquema y disposición de cauda de las partes del prototipo así mismo se plantea el dimensionamiento de cada uno de los componentes mediante las formulas obtenidas en la etapa de investigación y para condiciones de operación del esquipo establecidas inicialmente.

Etapa de construcción

En esta etapa se hace la selección de los materiales y equipos que se usaran para la construcción del prototipo y se realiza el montaje de cada una de las partes que componen el equipo y se realizaron pruebas de funcionamiento.

Etapa de operación

En la etapa de operación se realizó un análisis y selección de los parámetros para analizar, se planteó el tipo de muestras y los lugares para la toma de estas y se realizó una serie de pruebas de control para determinar el alcance de operación y funcionamiento del prototipo para la potabilización del agua mediante una serie de pruebas de control y se continuo con el desarrollo de pruebas de laboratorio para la obtención de datos de turbiedad y color.

3.1. Etapa de investigación

La investigación sobre los aspectos generales del proyecto se realizó mediante de consulta de diversas fuentes bibliográficas fundamentadas en 3 componentes del tema de investigación siendo así el primer componente el referente a los aspectos generales del agua, así como la metodología propuesta para la potabilización de las aguas fundamentalmente los principios que rigen dicho procedimiento en aspectos como la coagulación, floculación, sedimentación y desinfección.

El segundo componente del tema de investigación hace referencia al proceso directo de la evaporación, sus fundamentos teóricos, así como los procesos industriales en los que la evaporación es una operación unitaria usada en un entorno industrial, así mismo se investigó sobre

los tipos de evaporadores y su funcionamiento y se detallan aspectos fundamentales sobre la evaporación al vacío descritos en las fuentes consultadas.

En tercer lugar, se consultó la bibliografía referente a los balances de masa y energía y se describieron las ecuaciones fundamentales necesarias para el desarrollo de las ecuaciones que describen el dimensionamiento de cada uno de los componentes del prototipo de evaporador al vacío que planteo, es así que en base a estas ecuaciones fundamentales se realiza el desarrollo matemático para las ecuaciones y el dimensionamiento de los componentes del prototipo como se detalla a continuación.

Calculo del volumen y dimensiones de la cámara de evaporación

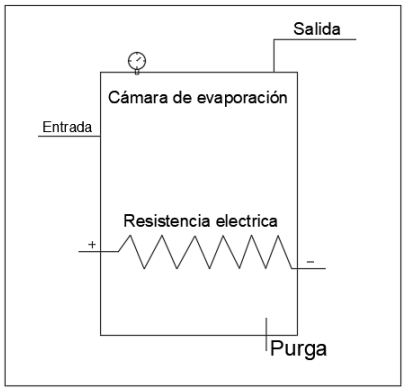


Ilustración 41. Componentes de la cámara de evaporación del prototipo de evaporador al vacío

Teniendo en cuenta que la cámara de evaporación iniciará llenada con un volumen inicial V se tendrá una condición de flujo no estacionario

Balance de masas

$$(\dot{m}_e - \dot{m}_s)\Delta t = \Delta m_{sistema}$$

$$(\dot{m}_e - \dot{m}_s)\Delta \mathrm{t} = m_2 - m_1$$

Despejando la masa resultante después de un tiempo de operación

$$m_2 = m_1 + (\dot{m}_e - \dot{m}_s)\Delta t \qquad (1)$$

Donde:

$m_2 = Masa\ final\ del\ sistema\ despues\ de\ un\ tiempo\ de\ operacion\ [m]$
$m_1 = Masa\ inicial\ en\ el\ sistema\ [m]$
$\dot{m}_e = Flujo\ masico\ que\ entra\ al\ sistema\ [kg/h]$
$\dot{m}_s = Flujo\ masico\ que\ sale\ del\ sistema\ [kg/h]$
$\Delta t = Tiempo\ de\ operacion\ [h]$

Para la altura de llenado en la cámara de evaporación de tipo cilíndrica se tiene que

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 h$$

Despejando h

$$h = \frac{4V}{\pi D^2}$$

Donde:

$h = Altura\ de\ llenado\ [m]$
$V = Volumen\ de\ la\ camara\ de\ evaporacion\ [m^3]$
$D = Diametro\ de\ la\ camara\ de\ evaporacion\ [m]$

Resistencia eléctrica

Teniendo en cuenta que el volumen de control es un sistema abierto y un flujo no estacionario

Se obtiene el balance de energía para el sistema:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \frac{dE_{sistema}}{dt}$$

Como el cambio de energía en el sistema es $\Delta E = m_2 e_2 - m_1 e_1$

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E$$

$$E_{entrada} - E_{salida} = m_2 e_2 - m_1 e_1$$

A partir de la anterior relación se obtiene que:

$$Q_E + W_E + \sum_E m\left(h_E + \frac{{V_E}^2}{2} + gZ_E\right) - Q_S + W_S + \sum_S m\left(h_S + \frac{{V_S}^2}{2} + gZ_S\right) = m_2 e_2 - m_1 e_1$$

Realizando el análisis de energías se obtiene que

- no hay entradas ni salidas de calor (Q=0)
- si hay entradas de trabajo, pero no salidas
- los aportes de energía potencial y cinética son despreciables

por lo tanto, la expresión anterior se transforma en:

$$W_E + m_E(h_E) - m_S(h_S) = m_2 e_2 - m_1 e_1$$

como $e = u + \frac{mv^2}{2} + gz$, debido a que los aportes de energías cinéticas y potencial son 0 el termino e se reduce a e=u

Despejando W_E se obtiene la expresión para el cálculo de

$$W_E = (m_2 u_2 - m_1 u_1) + m_S(h_S) - m_E(h_E) \qquad (2)$$

Donde:

$W_E =$ Potencia eléctrica de la resistencia [kJ]
$m_S = Masa\ del\ vapor\ extraido\ [kg]$
$h_S = Entalpia\ del\ vapor\ a\ condiciones\ de\ temperatura\ y\ presion\ dadas\ [kJ/kg]$
$m_E = Masa\ del\ agua\ de\ entrada\ [kg]$
$h_E = Entalpia\ del\ agua\ a\ condiciones\ de\ temperatura\ y\ presion\ dadas\ [kJ/kg]$
$m_2 = Masa\ final\ del\ sistema\ despues\ de\ un\ tiempo\ de\ operacion\ [m]$
$u_2 = \ Energia\ interna\ del\ agua\ en\ el\ estado\ final\ [kJ/kg]$
$m_1 = Masa\ inicial\ del\ sistema\ \ [m]$
$u_1 = \ Energia\ interna\ del\ aga\ en\ el\ estado\ inicial\ \ [kJ/kg]$

Intercambiador de calor

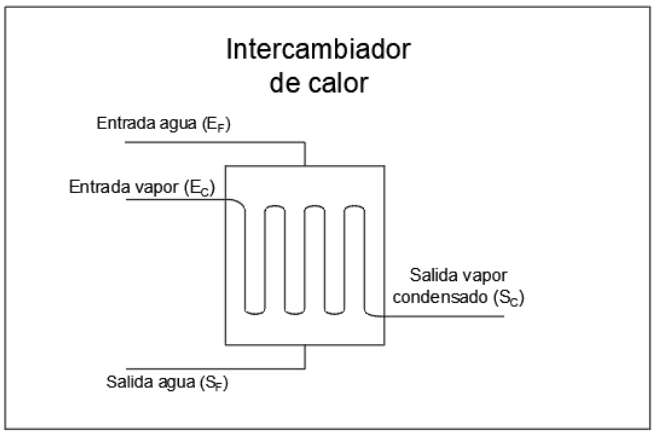


Ilustración 42. Esquema general del intercambiador para el prototipo de evaporador al vacío

Asumiendo unas condiciones de flujo estacionario y un sistema abierto se obtiene el balance de energía para el sistema:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{sistema}}{dt}$$

Como el cambio de energía en el sistema es cero la anterior ecuación se reduce a

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = 0$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

A partir de la anterior relación se obtiene que:

$$\dot{Q}_E + \dot{W}_E + \sum_E \dot{m}\left(h_E + \frac{{V_E}^2}{2} + gZ_E\right) = \dot{Q}_S + \dot{W}_S + \sum_S \dot{m}\left(h_S + \frac{{V_S}^2}{2} + gZ_S\right)$$

Realizando el análisis de energías se obtiene que

- no hay entradas ni salidas de calor (Q=0)
- no hay entradas ni salidas de trabajo (W=0)
- los aportes de energía potencial y cinética son despreciables

por lo tanto, la expresión anterior se transforma en:

$$\sum_E \dot{m}_E(h_E) = \sum_S \dot{m}_S(h_S)$$

De donde se obtiene

$$\dot{m}_{EC}(h_{EC}) + \dot{m}_{EF}(h_{EF}) = \dot{m}_{SC}(h_{SC}) + \dot{m}_{SF}(h_{SF})$$

Teniendo en cuanta que $\dot{m}_{EF}$ y $\dot{m}_{SF}$ son iguales, $\dot{m}_{EC}$ y $\dot{m}_{SC}$ también son iguales debido a que no hay entradas de masas adicionales y reordenando se obtiene que:

$$\dot{m}_{EC}(h_{EC}) - \dot{m}_{SC}(h_{SC}) = \dot{m}_{SF}(h_{SF}) - \dot{m}_{EF}(h_{EF})$$

$$\dot{m}_{C}[h_{EC} - h_{SC}] = \dot{m}_{F}[h_{SF} - h_{EF}]$$

Y despejando $\dot{m}_F$

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}_C[h_{EC} - h_{SC}]}{[h_{SF} - h_{EF}]} \qquad (3)$$

Donde:

$\dot{m}_F = Flujo\ masico\ de\ agua\ fria\ [kg/h]$
$h_{EF} = Entalpia\ de\ agua\ fria\ de\ entrada\ a\ condiciones\ de\ temperatura\ y\ presion\ dadas\ [kJ/kg]$
$h_{SF} = Entalpia\ de\ agua\ caliente\ de\ salida\ a\ condiciones\ de\ temperatura\ y\ presion\ dadas\ [kJ/kg]$
$\dot{m}_C = Flujo\ masico\ de\ vapor\ [kg/h]$
$h_{EC} = \ Entalpia\ del\ vapor\ de\ entrada\ a\ condiciones\ de\ temperatura\ y\ presion\ dadas\ [kJ/kg]$
$h_{SC} = Entalpia\ de\ agua\ condensada\ de\ salida\ a\ condiciones\ de\ temperatura\ y\ presion\ dadas\ [kj/kg]$

Bomba de vacío

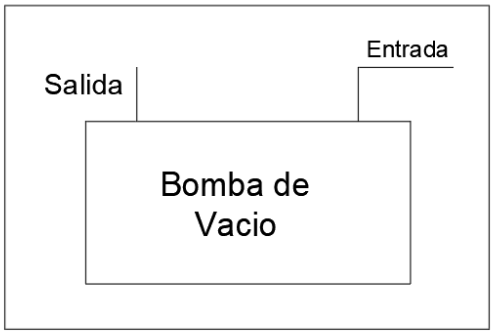


Ilustración 43. Esquema general para la bomba de vacío en el prototipo de evaporador al vacío

Asumiendo unas condiciones de flujo estacionario y un sistema abierto se obtiene el balance de energía para el sistema:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE_{sistema}}{dt}$$

Como el cambio de energía en el sistema es cero la anterior ecuación se reduce a

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = 0$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida}$$

A partir de la anterior relación se obtiene que:

$$\dot{Q}_E + \dot{W}_E + \sum_E \dot{m}\left(h_E + \frac{{V_E}^2}{2} + gZ_E\right) = \dot{Q}_S + \dot{W}_S + \sum_S \dot{m}\left(h_S + \frac{{V_S}^2}{2} + gZ_S\right)$$

Realizando el análisis de energías se obtiene que

- no hay entradas ni salidas de calor (Q=0)
- si hay entradas de trabajo, pero no salidas
- los aportes de energía potencial y cinética son despreciables
- los flujos másicos en la entrada y salida son iguales (m_1=m_2)

por lo tanto, la expresión anterior se transforma en:

$$\dot{W}_E + \dot{m}(h_E) = \dot{m}(h_S)$$

Despejando $\dot{W}_E$ se obtiene la expresión para el cálculo de

$$\dot{W}_E = \dot{m}(h_S) - \dot{m}(h_E)$$

Ordenando se obtiene que

$\dot{W}_E = \dot{m}[h_S - h_E]$ donde la entalpia h= u + Pv

De lo anterior como u es función de la temperatura y el cambio es mínimo este valor se desprecia quedando así:

$$\dot{W}_E = \dot{m}[P_S v_S - P_E v_E] \qquad (4)$$

Donde:

$\dot{W}_E = Potencia\ de\ la\ bomba\ de\ vacio\ [kW]$
$\dot{m} = Flujo\ masico\ extraido\ por\ la\ bomba\ [kg/s]$
$P = Presion\ de\ entrada\ y\ salida\ de\ la\ bomba\ [kPa]$
$v = Volumenes\ espicificos\ del\ fluido\ a\ la\ entrada\ y\ salida\ de\ la\ bomba\ [m^3/kg]$

Cálculo del diámetro de la tubería y caídas de presión

- Diámetro de la tubería de vapor

Siguiendo las recomendaciones de la GUÍA TÉCNICA DE DISTRIBUCIÓN DEL VAPOR DE SPIRAX SARCO

Se tiene que para calcular el diámetro de una línea de conducción de vapor se recomiendan el dimensionamiento según la velocidad del vapor donde:

$$seccion\ de\ la\ tuberia\ A = \frac{Caudal\ volumetrico\ (\dot{Q})}{Velocidad\ (V)}$$

A partir de la evacuación anterior y teniendo en cuenta el área de un circulo se obtiene

$$\frac{\pi * D^2}{4} = \frac{\dot{Q}}{V}$$

Finalmente despejando el diámetro

$$D = \sqrt{\frac{4 * \dot{Q}}{\pi * V}} \qquad (5)$$

Donde:

$D = Diametro\ de\ la\ tuberia\ [m]$
$\dot{Q} = Caudal\ volumetrico\ [m^3/s]$
$V = Velocidad\ del\ flujo\ [m/s]$

Según la guía técnica de Spirax Sarco según la experiencia recomiendan una velocidad razonable del flujo entre 25-40 m/s

- Caída de presión en la línea de condensado

Para determinar la caída de presión entre dos puntos se parte de la ecuación de energía

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{{V_1}^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{{V_2}^2}{2g} + Z_2 + h_L$$

De la anterior ecuación se supone que Z_1 y Z_2 son despreciable además de que el diámetro es constante por lo que $V_1 = V_2$ simplificándose lo anterior en:

$$\frac{P_1}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = h_L$$

$$P_1 - P_2 = \gamma * h_L$$

Donde h_L hace referencia a las pérdidas totales en el sistema y γ es el peso específico de la sustancia a las condiciones de presión dadas, reemplazando estos términos en la ecuación anterior se obtendrá la ecuación para el cálculo de la diferencia de presión:

$$\Delta P = \gamma * [f * \frac{L}{D} * \frac{\left(\frac{4 * \dot{Q}}{\pi * D^2}\right)^2}{2 * g} + K * \frac{\left(\frac{4 * \dot{Q}}{\pi * D^2}\right)^2}{2 * g}]$$

Reorganizando se obtiene:

$$\Delta P = \gamma * [f * \frac{16 * L * \dot{Q}^2}{2 * g * \pi^2 * D^5} + K * \frac{16 * \dot{Q}^2}{2 * g * \pi^2 * D^4}] \quad (6)$$

Donde:

$\Delta P = Diferencia\ de\ presion\ etre\ los\ dos\ puntos\ de\ la\ linea\ de\ condensacion\ [Pa]$
$\gamma = Peso\ especifico\ del\ fluido\ a\ las\ condiciones\ de\ presion\ [N/m^3]$
$f = Factor\ de\ friccion$
$L = Longitud\ de\ la\ tuberia\ [m]$
$\dot{Q} = Caudal\ estimado\ [m^3/s]$
$g = Aceleracion\ de\ la\ gravedad\ [m/s^2]$
$D = Diametro\ dela\ tuberia\ asumido\ [m]$

3.2. Etapa de diseño

Para la realización del diseño de un prototipo de evaporador al vacío y basados en los aspectos teóricos sobre el funcionamiento de este tipo de equipos se optó por el diseño presentado en la Ilustración 46, en esta se observa las partes principales que componen al prototipo, así como las líneas de conexión entre cada uno de ellos.

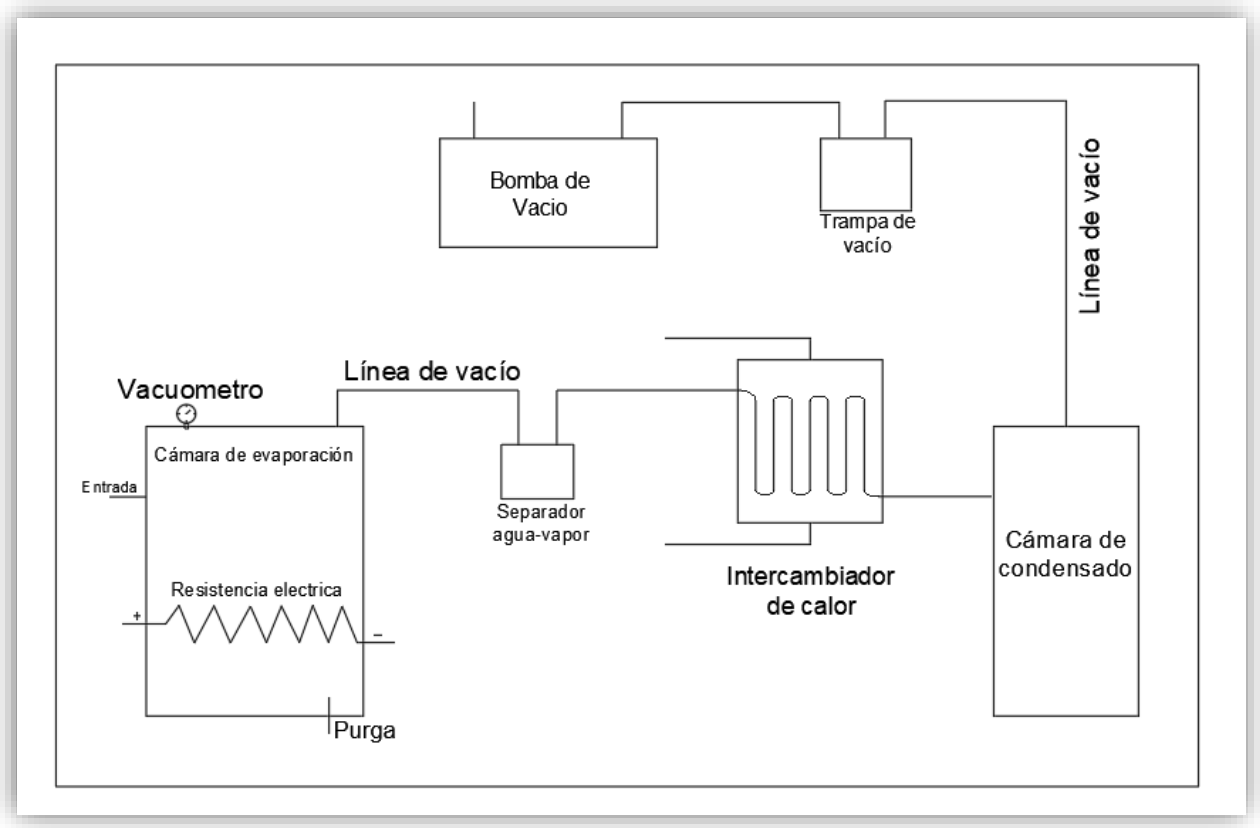


Ilustración 44. Esquema general del prototipo de evaporador al vacío

Siguiendo con el proceso de diseño y a partir de las ecuaciones deducidas a partir de los balances de masa y energía consultados para los componentes principales del diseño se establece el diseño de un prototipo de evaporador al vacío para las siguientes condiciones:

- Temperatura de operación 40°C
- Presión de operación 30 mbares
- Caudal 10 L/h
- Volumen de llenado 100 L

Calculo del volumen y dimensiones de la cámara de evaporación para un periodo de operación de 12 horas

Para el cálculo del volumen se determina el flujo másico de vapor que se desea extraer durante la operación

$$\dot{m}_s = 80\% \times 9.98\ \frac{kg}{h} = 7.98\ \frac{kg}{h}$$

Haciendo de la ecuación 1 se determina la masa final de agua que se acumula del sistema durante el tiempo de operación

$$m_f = 99.8\ kg + \left[\left(9.98\ \frac{kg}{h} - 7.98\ \frac{kg}{h}\right) \times 12\ h\right] = 123.8\ kg$$

A partir del dato de la masa final extraída se obtienen el volumen de agua durante el tiempo de operación

$$V_f = \frac{123.8\ kg}{\frac{1}{0.001003\ \frac{m^3}{kg}}} = 0.124\ m^3$$

Conociendo el volumen que total que se acumula durante la operación de 12 horas se determina la altura de llenado y a partir de esta se calcula la altura que se debe dejar entre el agua y la parte superior de la cámara de evaporación

$$h_{Ll} = \frac{4 \times 0.124\ m^3}{\pi \times (0.6\ m)^2} = 0.44\ m$$

$$h_{vap} = 40\% \times 0.44\ m = 0.18\ m$$

Calculo del sistema de conducción y caída de presión

- ***DIAMETRO DE LA TUBERIA DE VAPOR***

Según las recomendaciones de la GUÍA TÉCNICA DE DISTRIBUCIÓN DEL VAPOR DE SPIRAX SARCO se toma el valor de la velocidad del flujo de vapor como $V_{flujo} = 25\ \frac{m}{s}$ y se toman las siguientes condiciones de operación $\dot{m}_C = 7.98\ \frac{kg}{h}$ y $P_{trab} = 3\ kPa$

A partir de ellas se determina el caudal volumétrico

$$\dot{Q} = \frac{7.98\ \frac{kg}{h} \times 4.654 \frac{m^3}{kg}}{3600\ s} = 0.1011\ \frac{m^3}{s}$$

Se calcula el diámetro de la tubería de conducción con la ecuación 5 y se determina el diámetro comercial en pulgadas

$$D = \sqrt{\frac{4 \times 0.1011\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times\ 25\ \frac{m}{s}}} = 0.071\ m\ \cong 7.1\ cm$$

$$D_{comercial} = 3"\ \cong\ 7.62\ cm$$

- ***CAIDA DE PRESION EN LA TUBERIA DE CONDENSADO***

Para el cálculo de la caída de presión a partir de la ecuación 6 se requieren realizar el siguiente procedimiento

Se realiza el cálculo del peso específico para el agua a las condiciones de operación del sistema

$$\gamma = \frac{9.81\ \frac{m}{s^2}}{0.001003\ \frac{m^3}{kg}} = 9780.65\ \frac{N}{m^3}$$

Se calcula el flujo volumétrico a transportar dentro de la tubería de condensado

$$\dot{Q} = \frac{7.98\ \frac{kg}{h} \times 0.001003\ \frac{m^3}{kg}}{3600\ s} = 2.22 \times 10^{-6}\ \frac{m^3}{s}$$

Y se determina la velocidad con la fluye el fluido por la tubería

$$V = \frac{4 \times 2.22 \times 10^{-6}\ \frac{m^3}{s}}{\pi \times (0.0254\ m)^2} = 4.38 \times 10^{-3} \frac{m}{s}$$

A partir del cálculo de la velocidad se determina el número de Reynolds dependiendo del régimen del flujo.

$$R_e = \frac{4.38 \times 10^{-3} \frac{m}{s} \times 0.0254\, m}{6.56 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s}} = 169.59$$

$$f = \frac{64}{169.59} = 0.37$$

Se determinan las perdidas presentadas por el número de accesorio en el recorrido de la tubería

$$K = 2 \times (0.82) = 1.64$$

Finalmente, mediante la ecuación 6 se calculan la caída de presión asumiendo el diámetro de la tubería y con la longitud desde el inicio hasta el final de la tubería

$$\Delta P = 9780.65 \frac{N}{m^3} \times [0.37 \times \frac{2\, m \times \left(2.22 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)^2 \times 16}{2 \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times \pi^2 \times (0.0254\, m)^2} + 1.64 * \frac{\left(2.22 \times 10^{-6} \frac{m^3}{s}\right)^2 \times 16}{2 \times 9.81 \frac{m}{s^2} \times \pi^2 \times (0.0254\, m)^4}]$$

$$\Delta P = 0.294\, P_a$$

Cálculo de la resistencia eléctrica

Para el cálculo de las dimensiones de la resistencia eléctrica se extraen los valores de las energías internas del agua en los estados inicial y final de la tabla A-5 para agua saturada entrada por presión del libro Termodinámica Cengel.

$$m_f = 123.8\, kg \qquad U_f = 167.53\ kJ/kg$$
$$m_i = 99.8\, kg \qquad U_i = 83.913\ kJ/kg$$

De la misma tabla se extraen los valores de entalpia para la masa que entra como agua líquida y para la masa de vapor que sale.

$$m_e = 9.98\, kg \qquad h_e = 83.915\ kJ/kg$$
$$m_s = 7.98\, kg \qquad h_s = 2573.5\ kJ/kg$$

Se calcula la potencia requerida por la resistencia eléctrica para calentar la masa de agua dentro de la cámara de evaporación con la ecuación 2

$W_e = (123.8\ kg \times 167.53\ kJ/kg) - (99.8\ kg \times 83.913\ kJ/kg) + (7.98\ kg \times 2573.5\ kJ/kg) - (9.98\ kg \times 83.915\ kJ/kg)$

$W_e = 32064.5\ kJ$ y como 1 kWh es equivalente a 3600 kJ la potencia eléctrica será $W_e = 8{,}9\ kWh$

Cálculo del intercambiador de calor

A partir de los datos conocidos del flujo de vapor $\dot{m}_C = 7.98\ \frac{kg}{h}$ y teniendo en cuenta las temperaturas iniciales y finales del vapor y el líquido refrigerante en el intercambiador (agua) se extraen las entalpias de la tabla A-4 agua saturada entrada por temperatura del libro Termodinámica Cengel

$$T_{EF} = 20\ °C \quad h_{EF} = 83.915\ kJ/kg$$
$$T_{SF} = 40\ °C \quad h_{SF} = 167.53\ kJ/kg$$

$$T_{EC} = 40\ °C \quad h_{EC} = 2573.5\ kJ/kg$$
$$T_{SC} = 20\ °C \quad h_{SC} = 167.53\ kJ/kg$$

Mediante la ecuación 3 se calcula la masa de agua fría que se requiere en el intercambiador de calor para convertir el flujo de vapor extraído de la cámara de exploración al estado liquido

$$\dot{m}_F = \frac{7.98\ \frac{kg}{h} \times (2573.5\ kJ/kg - 167.53\ kJ/kg)}{(167.53\ kJ/kg - 83.915\ kJ/kg\ )} = 229.6\ \frac{kg}{h}$$

$$\dot{m}_F = 229.6\ \frac{kg}{h} \times \frac{1\ h}{3600\ s} = 0.064\ \frac{kg}{s}$$

Cálculo de la bomba de vacío

Con las condiciones iniciales propuestas para el sistema y las condiciones de presión atmosférica del lugar donde se ubicaría el equipo se obtienen los valores de los volúmenes

específicos de la tabla A-5 agua saturada entrada por presión del libro de Termodinámica de Cengel y se obtienen los siguientes datos

$$\dot{m}_C = 7.98\ \frac{kg}{h} \times \frac{1\ h}{3600\ s} = 2.216 \times 10^{-3}\ \frac{kg}{s}$$

$$P_E = 3\ kPa \qquad v_E = 45.654\ m^3/kg$$
$$P_S = 74.2\ kPa \qquad v_S = 2.2172\ m^3/kg$$

A partir de los datos anteriores y con la ecuación 4 se determina la potencia requerida por la bomba de vacío para generar el vacío propuesto para la operación del prototipo de evaporador al vacío

$$\dot{W}_E = 2.216 \times 10^{-3}\ \frac{kg}{s} * [(74.2\ kPa \times 2.2172\ m^3/kg) - (3\ kPa \times 45.654\ m^3/kg)]$$

$$\dot{W}_E = 0.060\ kW$$

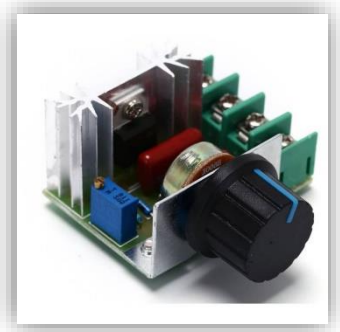
3.3. Etapa de construcción

Para la etapa construcción del prototipo de evaporador frente a la dificultad de conseguir equipos y materiales con las dimensiones obtenidas en la etapa de diseño se opta por hacer uso de los materiales y equipos propuestos en la Tabla 11.

Tabla 11. Materiales y equipos usados en el prototipo de evaporador al vacío

MATERIAL		FUNCION
	VACUOMETRO 1 BAR	Instrumento de medición del vacío con un rango de entre 0 y -1 bar de vacío.

	LLAVE DE BOLA 1/4"	Llave de paso para el control de flujo de entrada y purga en la cámara de evaporación.
	RESISTENCIA ELECTRICA 1100 W, 110 A	Resistencia eléctrica de inmersión para calentamiento de líquidos.
	RACOR DE CONEXIÓN DE 1/4“	Racores para conexión de llaves de entrada de flujo y purga en la cámara de evaporación.
	SERPENTIN DE COBRE	Serpentín de cobre para el paso de un flujo de un flujo vapor caliente inmerso en agua para el intercambio de calor.

	RACOR DE 90° DE 1/4”	Racor de conexión para unión de mangueras de conexión entre las diversas partes del proceso.
	DIMMER REGULADOR DE VOLTAJE	Instrumento electrónico para el control del voltaje usado para controlar la temperatura dentro de la cámara de evaporación.
	MANGUERA DE CONEXIÓN DE DIAMETRO 1/4"	Mangueras de conexión para transporte del vapor entre las distintas partes del sistema.
	RECIPIENTE DE CONDENSADO	Recipiente de acero inoxidable para la recepción del vapor condensado.

	SEPARADOR DE AGUA-VAPOR	Recipiente intermedio entre la cámara de evaporación y el serpentín para evitar el flujo de líquido desde la cámara hasta el intercambiador de calor.
	MEDIDOR DE TEMPERATURA	Medidor electrónico de temperatura que se conecta al termopar.
	BOMBA DE VACIO 160 W	Equipo mecánico que extrae el aire de un sistema para generar vacío.

	TRAMPA DE VACIO	Instrumento que se ubica antes de la bomba de vacío que controla el paso del aire y evita el paso de líquidos hacia la bomba de vacío.
	TERMOPAR TIPO K	Sonda para la medición de temperaturas.

Montaje

Para el montaje del equipo se utilizan los equipos y materiales descritos anteriormente, para la instalación de las conexiones para las llaves en entrada y salida de la cámara de evaporado se perforo está haciendo uso de un taladro y procediendo a la instalación de los racores en sus respectivos lugares así como el ajuste de estos garantizando el correcto sellado para evitar fugas, de igual manera se realizó la perforación de un agujero en la tapa de la cámara de evaporado en el lugar donde se ubicó el Vacuómetro y en la parte lateral siguiendo el mismo proceso se instaló la resistencia eléctrica de 1100 W que calentara el fluido.

Se realizó la construcción de una estructura de soporte en acero de forma rectangular con 2 niveles uno superior y otro inferior sobre la cual estarán ubicadas las partes del prototipo del evaporador, sobre el nivel inferior y elevado a una distancia del suelo sobre los niveladores de la estructura se ubicó la cámara de evaporado con el montaje de las conexiones, Vacuómetro y resistencia eléctrica,

sobre este mismo nivel se ubicó el dimmer o regulador de voltaje que se conectó a la resistencia eléctrica mediante un cableado para permitir el control de la temperatura del agua dentro de la cámara mediante el sensor de temperatura.

En el mismo nivel se ubicaron el separador de agua-vapor que conecta mediante mangueras con la salida de vapor dela cámara de evaporado y el intercambiador de calor que a su vez se conecta mediante mangueras con la cámara de condensado como se observa en la Ilustración 47.

En el nivel superior se ubican la bomba de vacío y la trampa de vacío que se ubica en un punto intermedio entre la bomba y la cámara de condensado y se conecta mediante mangueras a las entradas de la bomba y la salida superior de la cámara de condensado.



Ilustración 45. Montaje del prototipo de evaporador al vacío con sus partes



Ilustración 46. Montaje del prototipo de evaporador al vacío en el laboratorio para su operación

3.4. Etapa de operación

La etapa de operación se desarrolló teniendo en cuenta 2 aspectos, el primero la toma de muestras y el segundo la puesta en marcha del prototipo en el laboratorio para la toma de datos.

Toma de muestras

Las muestras utilizadas en la investigación se encuentran dispuestas en 2 tipos de pruebas efectuadas, el primero se denominan pruebas de control las cuales se preparan directamente en el laboratorio mediante la mezcla de una fracción de agua y una de colorante para ser usada como medio de control durante el proceso de ajuste del funcionamiento del prototipo hasta obtener los resultados deseados. El segundo tipo de pruebas realizadas fueron las de laboratorio mediante las que obtuvieron los datos de turbiedad y color durante la etapa de operación, en estas pruebas se usaron 2 tipos de muestras siendo las primeras una mezcla de agua y arena/arcilla para obtener

aguas con valores de turbiedad y color para su análisis en el laboratorio, el segundo de muestras fueron tomadas de diversos sectores dispuestos sobre el rio pamplonita para la toma de datos de turbiedad y color más ajustados a los que se encuentran en ambientes naturales.

Encendido y operación del prototipo

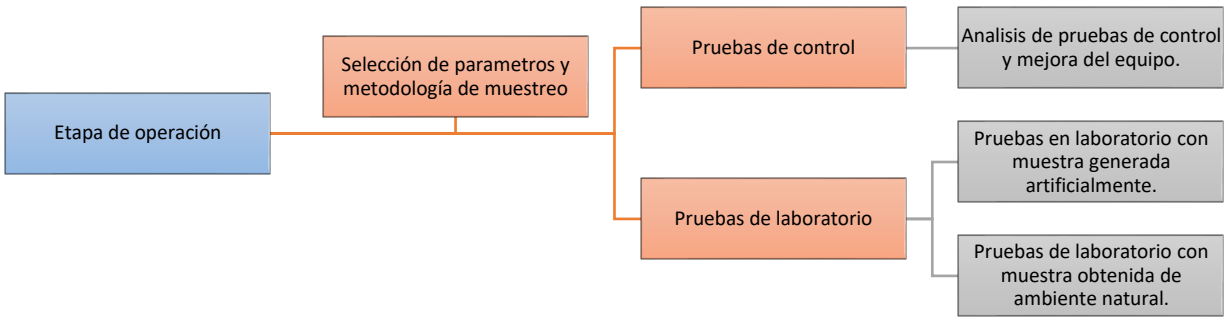


Ilustración 47. Planteamiento del método para la obtención de muestras y operación del prototipo en el laboratorio

Una vez tomadas las muestras estas son llevadas al laboratorio, inicialmente se debe llenar la cámara de evaporado con la muestra hasta el volumen de control sin realizar un llenado total, seguidamente se enciende la resistencia eléctrica y se deja calentando la muestra hasta alcanzar la temperatura de operación propuesta, después de revisada todas las conexiones y asegurado el sellado total del prototipo para garantizar un correcto vacío se enciende la bomba de vacío y se deja operando el equipo durante el tiempo de operación.

Finalmente, después de realizada la operación se procede a la toma de las muestras de la fracción de vapor condensado en la cámara de condensado para su posterior análisis en el laboratorio mediante el uso de un turbidímetro y un espectrofotómetro calibrado en cero y se realiza el vaciado de la cámara de evaporado abriendo la llave de descarga instalada en la parte inferior de esta.

4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Pruebas de control

En el desarrollo de las pruebas de laboratorio con el diseño a escala laboratorio de un evaporador al vacío se realizaron una serie de pruebas de control con agua tinturada con colorante violeta y verde con el objetivo de observar el comportamiento del equipo y observar que dicho equipo funcione adecuadamente, así como determinar fallas o fugas que afectasen las pruebas con aguas en estado natural.



Ilustración 48. agua con colorante violeta y verde como medio de control

Prueba de control 1

Las pruebas de control se realizaron en el laboratorio con el equipo construido y montado con sus correspondientes partes, la primera prueba se realizó en las condiciones mostradas en la Tabla 12.

Tabla 12. Datos de operación para la prueba de control 1

Prueba de control 1		
Intercambiador calor	Directo	
Volumen de control	4	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:40	min

Los datos obtenidos se tabularon en la Tabla 13 e Ilustración 51 en la que observa la cantidad de volumen condensado, así como la cantidad de líquido que no se evaporo en la cámara de evaporación.

Tabla 13. Datos obtenidos en la prueba de control 1

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,08	L
Volumen en cámara Evaporación	3,9	L
Volumen total	3,98	L

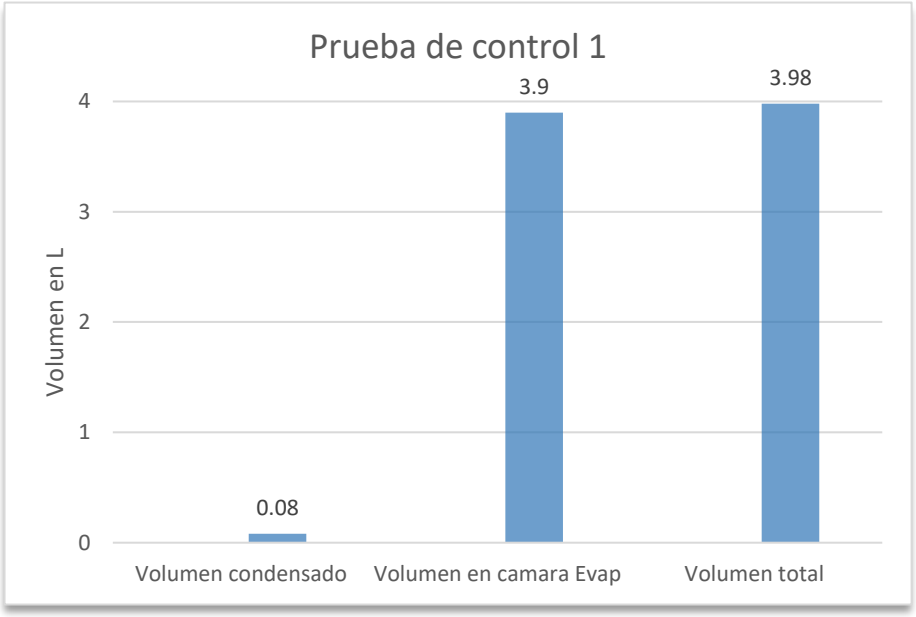


Ilustración 49. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 1

En la Ilustración 51 se observa que la cantidad de líquido que se condenso en comparación con el volumen de control es muy pequeña y se asume que este comportamiento se da por el tiempo de trabajo que se estableció de 15 minutos como consecuencia de la forma de trabajo de la bomba de vacío que cuenta con un sistema de apagado al calentarse dando como resultado su apagado a los 15 minutos.

En la Ilustración 52 se observa la diferencia de coloración entre la muestra de control que se observa de un color rojizo fuerte y el líquido condensado en la cámara de condensado que se observa de color con tonalidad naranja.



Ilustración 50. Resultados de la prueba de control 1 en laboratorio

La coloración naranja en el líquido condensado en la Ilustración 52 se ha dado como consecuencia del arrastre de color del papel filtro que se estableció entre la cámara de evaporación y el intercambiador de calor afectando la muestra y dando la tonalidad naranja no obstante la prueba permite observar el funcionamiento del evaporador al vacío en el su ciclo de evaporación y condensación.

Prueba de control 2

En la prueba de control 2 no se realizaron cambios en el diseño o el montaje del equipo como se observa en la Tabla 14 en la que se trabaja con los mismos datos de operación que en la prueba de control 1.

Tabla 14. Datos de operación para la prueba de control 2

Prueba de control 2		
Intercambiador calor	Directo	
Volumen de control	4	L
Presión de trabajo	-0,69	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:00	min

Tabla 15. Datos obtenidos en la prueba de control 2

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,09	L
Volumen en cámara Evaporación	3,9	L
Volumen total	3,99	L

En la Tabla 15 e Ilustración 53 se observan los datos obtenidos en la realización de la prueba de control 2 cuyos resultados se observa una similitud considerable con la prueba de control 1 evidenciando que en ausencia de cambios en el equipo de evaporación a vacío o en las condiciones de operación se pueden obtener resultados homogéneos o similares entre las pruebas realizadas.

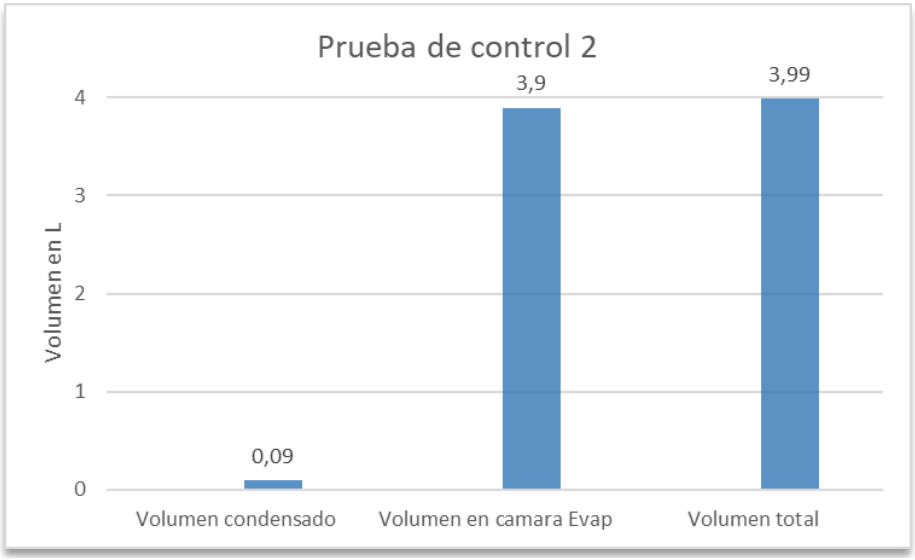


Ilustración 51. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 2

En la Ilustración 53 se observa de igual manera que el volumen condensado en relación con el valor en litros (L) de la prueba de control sigue siendo muy inferior como resultado de los tiempos de operación limitados que se pueden trabajar debido al funcionamiento de la bomba de vacío.



Ilustración 52. Resultados de la prueba de control 2 en laboratorio

En la Ilustración 54 se observa la coloración obtenida al finalizar la prueba en la cámara de condensado y de la muestra de control en la que se evidencia nuevamente el funcionamiento del ciclo de evaporación y condensación del equipo de trabajo además nuevamente se aprecia la coloración naranja en el líquido de la cámara de condensado debido al papel filtro usado en el filtro de gasolina que no fue retirado dando consistencia con la prueba de control 1 y la alteración de los resultados en términos de la coloración final esperada.

Prueba de control 3

La prueba de control se realizó con el equipo en el laboratorio con los datos de la Tabla 16, aunque para esta prueba se realizaron varios cambios en el equipo los cuales fueron el retiro del filtro de gasolina para evitar la alteración de la coloración en el líquido condensado además de que el sistema de intercambia de calor usado para el enfriamiento del vapor que se extrae de la cámara de evaporación se realizó ahora con una recirculación para evitar el sobrecalentamiento del líquido de enfriamiento (agua).

Tabla 16. Datos de operación para la prueba de control 3

Prueba de control 3		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	4	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:55	min

Tabla 17. Datos obtenidos en la prueba de control 3

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,17	L
Volumen en cámara Evaporación	3,7	L
Volumen total	3,87	L

En la Tabla 17 e Ilustración 55 se logra evidenciar los resultados obtenidos en la prueba de control 3 con los cambios realizados en el filtro y en el intercambiador de calor, en esta prueba se evidencia un aumento en el volumen de líquido condensado en relación a las primeras pruebas de control como resultado de la recirculación del agua en el sistema de intercambiador de calor exhibiendo que la dicha recirculación afecta en la fase de condensado.

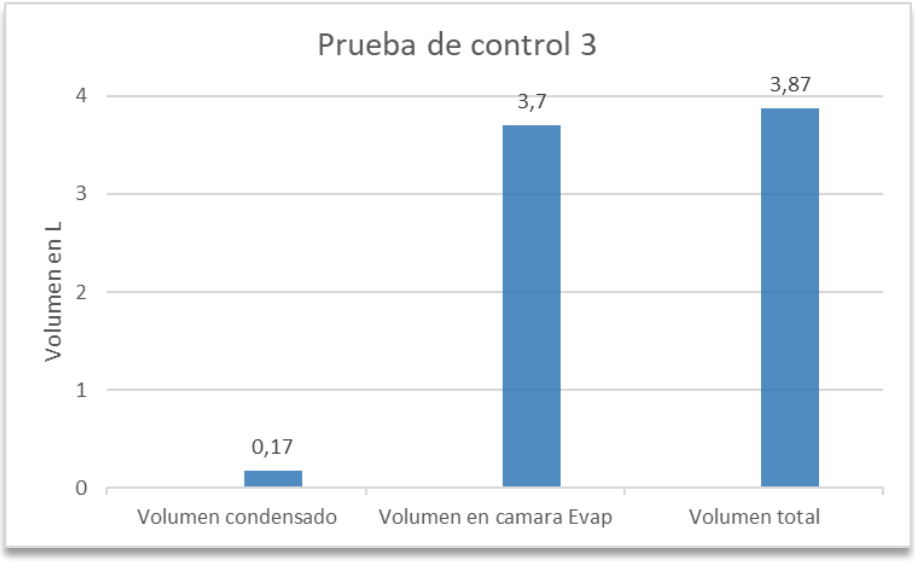


Ilustración 53. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 3

En la Ilustración 55 se observa que, aunque se produjo un aumento del volumen condensado en comparación de las pruebas anteriores el volumen condensado en relación al volumen total de la muestra de control sigue siendo muy bajo debido al tiempo de trabajo como se ha indicado anteriormente.



Ilustración 54. Resultados de la prueba de control 3 en laboratorio

En la Ilustración 56 se observa la coloración obtenida en el líquido condensado el cual se diferencia significativamente de la coloración la muestra en la cámara de evaporación justo como se espera de un sistema de evaporación, pero se observa aun una tonalidad naranja no deseada.

Esta coloración en el líquido condensado se atribuye a pequeñas partículas de líquido que son atraídas por la fuerza de succión de la bomba de vacío sobre el sistema para extraer el aire y posteriormente caen a la cámara de condensado donde se mezclan con el líquido dando esa coloración más degradada de la muestra de control estudiada.

Prueba de control 4

La prueba de control 4 se realiza con las modificaciones realizadas en la anterior prueba al equipo y con los datos de operación establecidos en la Tabla 18.

Tabla 18. Datos de operación para la prueba de control 4

Prueba de control 4		
Intercambiador calor	Recirculado	
Volumen de control	4	L
Presión de trabajo	-0,69	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:40	min

Tabla 19. Datos obtenidos en la prueba de control 4

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,12	L
Volumen en cámara Evaporación	3,8	L
Volumen total	3,92	L

En la Tabla 19 e Ilustración 57 se observan los resultados obtenidos para la prueba de control 4 los cuales presentan una similitud con los datos de la prueba de control 3 esto como se intuyó anteriormente que en ausencia de cambios significativos en la operación y el diseño los resultados tienden a un comportamiento similar.

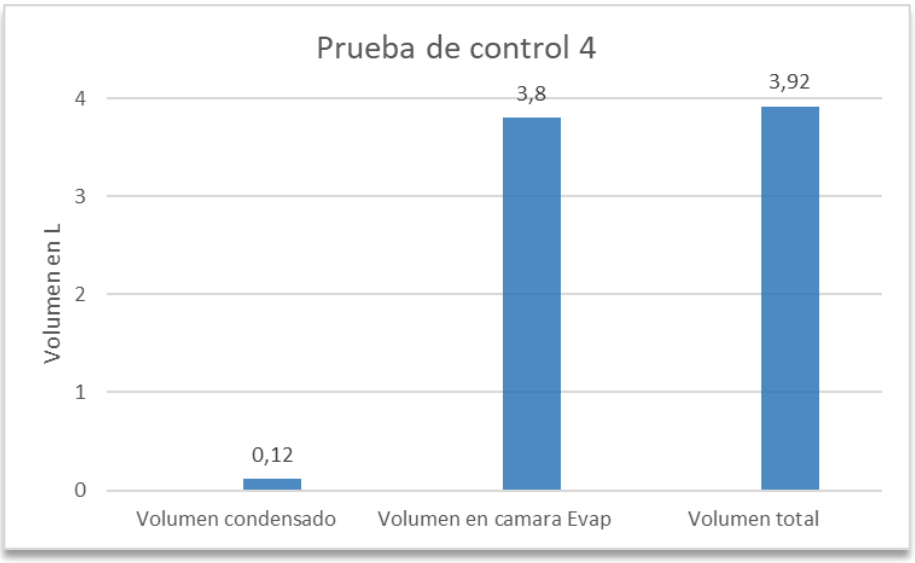


Ilustración 55. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 4

En la Ilustración 57 gráficamente se observa como el volumen condensado presenta un aumento frente a las pruebas en donde el sistema de condensado no presentaba una recirculación (prueba 1 y 2) pero en comparación con la prueba 3 si se observa una pequeña disminución en el valor obtenido en el condensado.

Esta disminución es atribuida a la ineficiencia y/o homogeneidad de las condiciones de trabajo del sistema de intercambio de calor debido a ser un dispositivo realizado de manera "cacera" que imposibilitan mantener un intercambio de calor entre el vapor caliente y el líquido refrigerante (agua) de manera estableces en el tiempo.



Ilustración 56. Resultados de la prueba de control 4 en laboratorio

En la Ilustración 58 se observa que la coloración obtenida en el condensado presenta una tonalidad aún más clara que la prueba anterior aun sin ningún tipo de filtrado o "trampa" que evite la extracción de partículas liquidas con colorante que puedan mezclarse al final del proceso y alterar las muestra, la disminución en la tonalidad evidencia la necesidad de un medio filtrante o "trampa" como medida preventiva para evitar la alteración del color final obtenido en el condensado por estar partículas que son extraídas desde la cámara de evaporación.

Prueba de control 5

La prueba de control 5 se realizó con los datos de la Tabla 20 y con el cambio en la coloración de la muestra de control por una tonalidad verde con el objetivo de evidenciar cambios o diferencias frente a la coloración usada en las pruebas de control y tener los datos visuales de estudio para mejorar el sistema de evaporación al vacío además de que el volumen de control es disminuido de 4 a 2 litros (L).

Tabla 20. Datos de operación para la prueba de control 5

Prueba de control 5		
Intercambiador calor	Recirculado	
Volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,69	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:10	min

Tabla 21. Datos obtenidos en la prueba de control 5

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,12	L
Volumen en cámara Evaporación	1,8	L
Volumen total	1,92	L

En la Tabla 21 e Ilustración 59 se observan los datos recopilados para esta prueba de control ahora con el cambio de titulación en la muestra y la disminución del volumen de control.

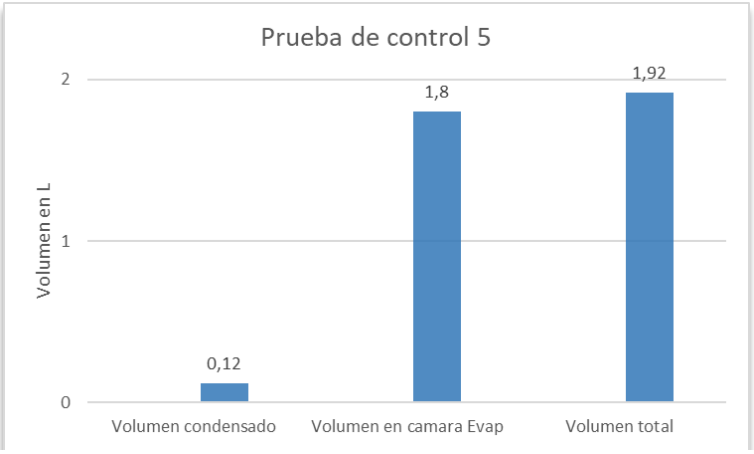


Ilustración 57. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 5

En la Ilustración 59 no se evidencia un cambio significativo en el volumen de condensado debido a la disminución de la masa de líquido en la cámara de evaporación por lo que se puede descartar este factor como uno determinante dentro del funcionamiento del evaporador al vacío al observar que se mantiene las mismas proporciones entre el volumen condensado y el volumen restante en la cámara de evaporación observándose que para los 15 minutos de operación apenas un pequeña porción se logra extraer del total del volumen analizado como se observa de igual manera en las pruebas anteriores.

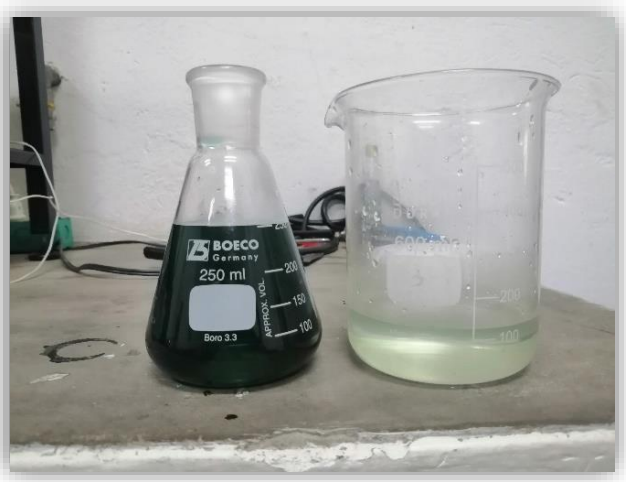


Ilustración 58. Resultados de la prueba de control 5 en laboratorio

En la Ilustración 60 se compara las tonalidades de color obtenidas en la prueba de control 5 observándose nuevamente que, aunque se presentándose una disminución significativa del color en el condensado en comparación del color de la muestra de control sigue presentando una tonalidad verde clara como consecuencia de la falta de un filtro o "trampa" para evitar que partículas liquidas con colorante sean extraídas por el sistema de vacío hasta la cámara de condensado y afecten la muestra como observo en la aprueba anterior con los mismos resultados.

Prueba de control 6

La prueba de control se realizó en el laboratorio con las mismas condiciones de volumen y coloración de la prueba anterior como se observa en la Tabla 22 además se instaló un filtro "casero"

en cuyo caso fue usado como medio para retener particular una sección de tela compuesta por fibras de fique.

Tabla 22. Datos de operación para la prueba de control 6

Prueba de control 6		
Intercambiador calor	Recirculado	
Volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	14:39	min

Tabla 23. Datos obtenidos en la prueba de control 6

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,11	L
Volumen en cámara Evaporación	1,89	L
Volumen total	2	L

En la Tabla 23 e Ilustración 61 se sigue observando el mismo comportamiento de las pruebas anteriores según los datos obtenidos para la prueba de control 6 en el laboratorio.

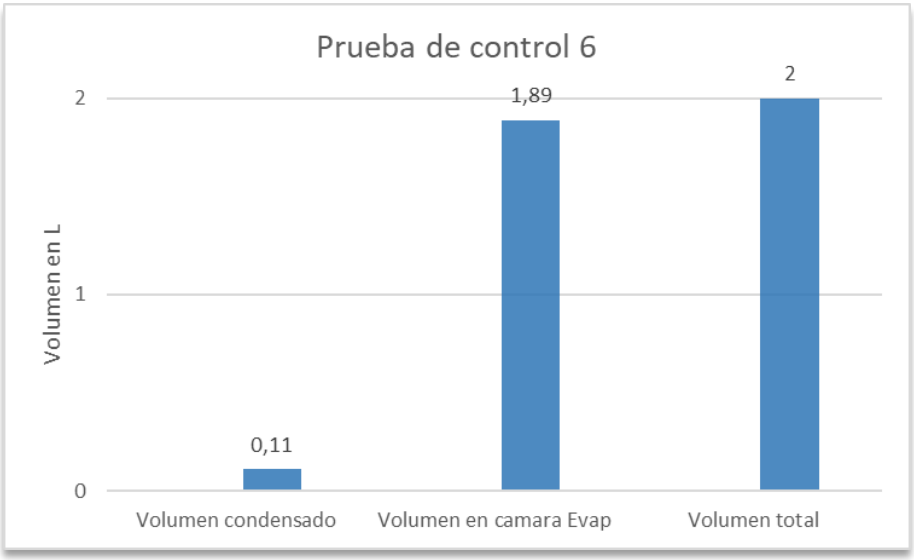


Ilustración 59. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 6

En la Ilustración 61 se observa gráficamente que el volumen condensado en relación con el volumen de control usado en la prueba 6 mantiene la misma proporción como se ha observado en las pruebas anteriores.

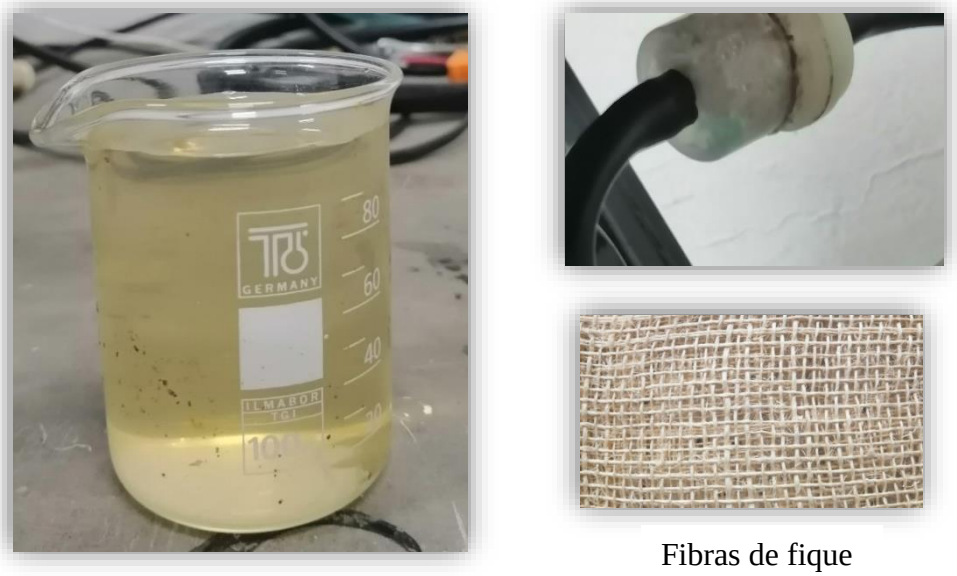


Ilustración 60. Resultados de la prueba de control 6 en laboratorio; en el lado izquierdo se muestra el filtro usado en la prueba y el material usado

En la Ilustración 62 se observa en condensado obtenido para la prueba de control 6 en cuyo caso se ha obtenido un líquido condensado que presenta ausencia de coloración verde o similar como se había obtenido en los casos anteriores esto se intuye a utilización de un filtro que evito que posibles partículas liquidas extraídas de la cámara de evaporación pudiesen afectar la muestra con la coloración de la muestra estudiada como sucedió en los casos anteriores, esto se observa en la Ilustración 62 en la parte superior derecha donde se evidencia una pequeña muestra liquida que quedó atrapada en el filtro y presenta una tonalidad verde como era de esperarse, no obstante, el líquido condensado si presenta una coloración amarillosa la cual es atribuida a la coloración natural del fique usado como medio filtrante para evitar el paso de las partículas de la macara de evaporación hacia la cámara de condensado.

Prueba de control 7

la prueba de control 7 se realizó en condiciones similares a las establecidas en la prueba de control 6 como se observa en la Tabla 24 anqué se usó para esta prueba una coloración diferente con el objetivo de observar si el filtro instalado seguía nuevamente impidiendo la coloración por la extracción de partículas liquidas en el líquido condensado.

Tabla 24. Datos de operación para la prueba de control 7

Prueba de control 7		
Intercambiador calor	Recirculado	
Volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,69	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:29	min

Tabla 25. Datos obtenidos en la prueba de control 7

Datos obtenidos		
Volumen condensado	0,09	L
Volumen en cámara Evaporación	1,9	L
Volumen total	1,99	L

Siguiendo la tendencia que ha presentado en las pruebas anteriores se observa en la Tabla 25 e Ilustración 63 que no se han presentado cambios significativos en las proporciones del líquido condensado y el volumen usado en la prueba de estudio.

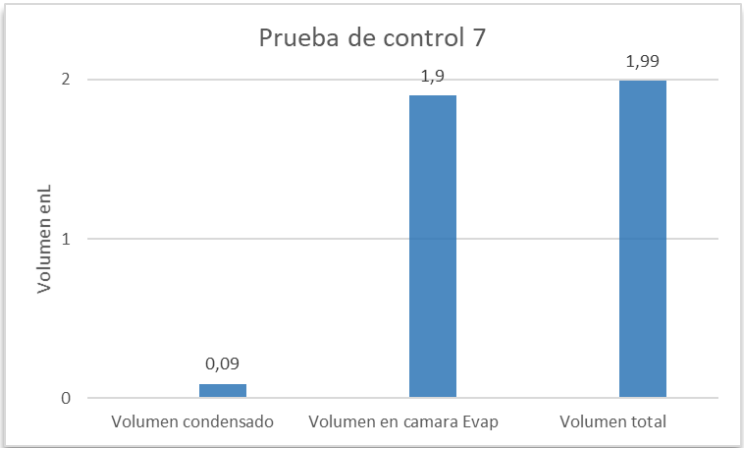


Ilustración 61. Gráfico de los datos obtenidos en la prueba 7



Ilustración 62. Resultados de la prueba de control 7 en laboratorio

En la Ilustración 64 según los resultados obtenidos al finalizar la prueba se puede observar que el líquido condensado presenta una coloración completamente clara con ausencia de cualquier tipo de coloración como se espera de un sistema de evaporación a vacío el cual solo debe condensar el vapor extraído de la cámara de evaporación.

Se observan las diferencias entre el color de la muestra analizada y el color cristalino de la muestra condensada esto por acción del filtro que evito que alguna partícula con coloración capaz de alterar el resultado final terminara en la cámara de condensado.

4.2. Pruebas de laboratorio

Siguiendo con el desarrollo de la investigación con el prototipo de evaporador al vacío se realizaron en el laboratorio una serie de pruebas para determinar la potabilización de una serie de muestras de agua analizando las características de turbiedad y color, para esto se realizaron una serie de muestras elaboradas en el laboratorio (Ilustración 65) mezclando agua y arenas para simular valor de turbiedad y color, además se tomaron muestras aleatorias en diversos sectores del

rio pamplonita para realzar un análisis de turbiedad y color con muestras de agua cruda extraídas de una fuente natural.



Ilustración 63. Muestra control usada en pruebas de laboratorio

Prueba de laboratorio 1

Para la prueba número 1 se tomó una muestra de agua elaborada en el laboratorio mezclando agua más arenas para simular turbiedad y color, dicha muestra se procesó en el prototipo con las condiciones que se muestran en la Tabla 26 y para los valores iniciales de turbiedad y color que se muestran en ella.

Tabla 26. Datos de operación para la prueba de laboratorio 1

Prueba #1		
Intercambiador calor	Directo	
volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,6	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:00	min
Turbiedad inicial	154	UNT
Color inicial	590	UPC

El proceso de potabilización para la muestra 1 se realizó el procedimiento de operación del prototipo como se realizó en las pruebas de control hasta obtenerse una muestra final que se analizó en laboratorio dando los resultados que se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 1

Datos obtenidos		
Turbiedad final	3	UNT
Color final	22	UPC

En la Ilustración 66 e Ilustración 67 se observan graficados los datos obtenidos para la prueba número 1 en la que detalla la disminución de los valores de turbiedad y color como era de esperarse.

En el análisis de la turbiedad (Ilustración 66) se logra observar una importante disminución del valor inicial de turbiedad desde los 154 UNT hasta los 3 UNT, en conformidad con la resolución 2115 de 2007 que establece los valores aceptables para aguas de consumo humano aún se observa que en dicha muestra no se logró el cumplimiento de esta, aunque el valor de turbiedad final se encuentra cerca del valor aceptable por la normatividad colombiana.

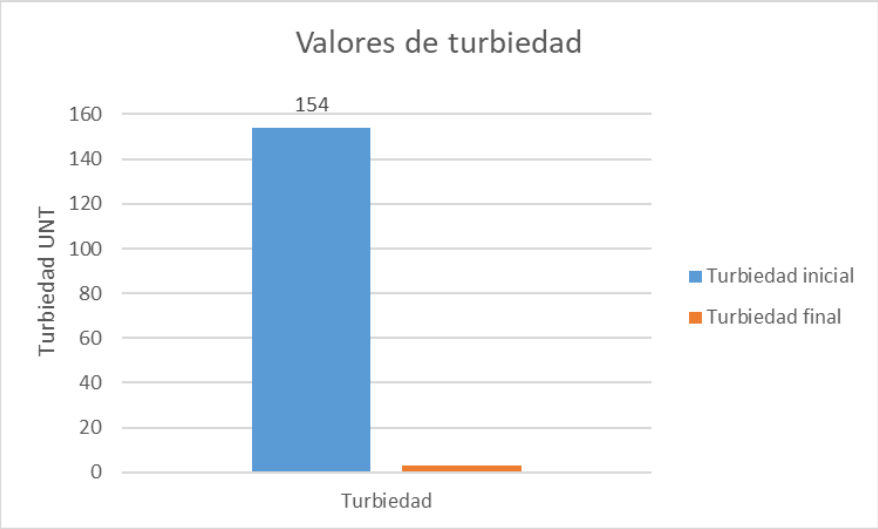


Ilustración 64. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 1

En la Ilustración 67 se observa para la muestra 1 los valores de color en unidades de UPC obtenidos en la que se logra observar la disminución presentada mediante el proceso de potabilización realizada, no obstante, en cumplimiento de la normatividad los valores registrados aún se encuentran fuera del rango establecido para aguas de consumo humano.

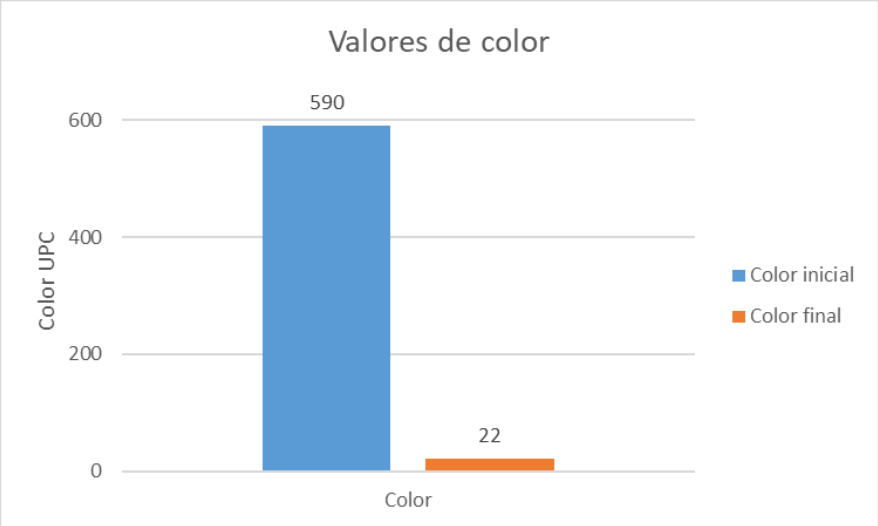


Ilustración 65. Valores de color en la prueba de laboratorio 1



Ilustración 66. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 1; en a la Izquierda muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

La Ilustración 68 muestra de manera visual la disminución de las características presentes en el agua analizada, la imagen de la izquierda (agua cruda) presenta una coloración más amarillenta frente a la imagen de la derecha (muestra potabilizada) que presenta una tonalidad más clara como se esperaba de un proceso que elimina sustancias presentes en el agua.

Prueba de laboratorio 2

Para la prueba se realizó el mismo procedimiento establecido con una muestra de agua nueva realizada en el labora tío para obtener nuevos valores de turbiedad y color como se presentan en la Tabla 28.

Tabla 28. Datos de operación para la prueba de laboratorio 2

Prueba #2		
Intercambiador calor	Directo	
volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,6	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:00	min
Turbiedad inicial	352	UNT
Color inicial	1250	UPC

Los valores de turbiedad y color inicial presentan valores de 352 UNT y 1250 UPC respectivamente los cuales son valores altos para aguas crudas.

En la Tabla 29 se presentan los datos obtenidos después de realizar en proceso de potabilización de la muestra en el prototipo dando los siguientes resultados.

Tabla 29. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 2

Datos obtenidos		
Turbiedad final	3,02	UNT
Color final	36	UPC

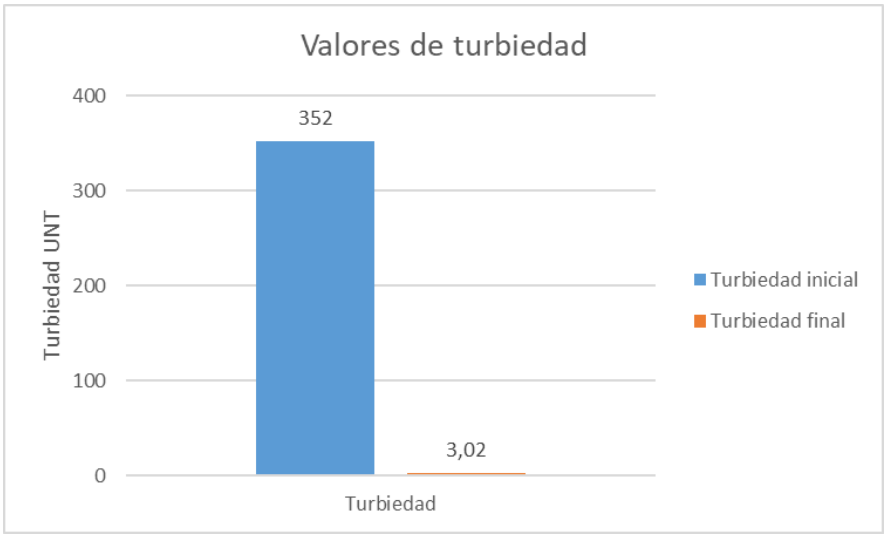


Ilustración 67. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 2

En la Ilustración 67 se observa la disminución de los valores iníciales de turbiedad de la muestra número 2 analizada, se observa que la muestra presentaba una turbiedad inicial de 352 UNT medidas y el valor final obtenido después del proceso fue de 3,02 UNT presentando una reducción importante de la turbiedad presente en la muestra tratada, no obstante, aun en cumplimiento de la norma los valores obtenidos se mantienen, aunque cerca del valor aceptable por fuera del rango establecido.

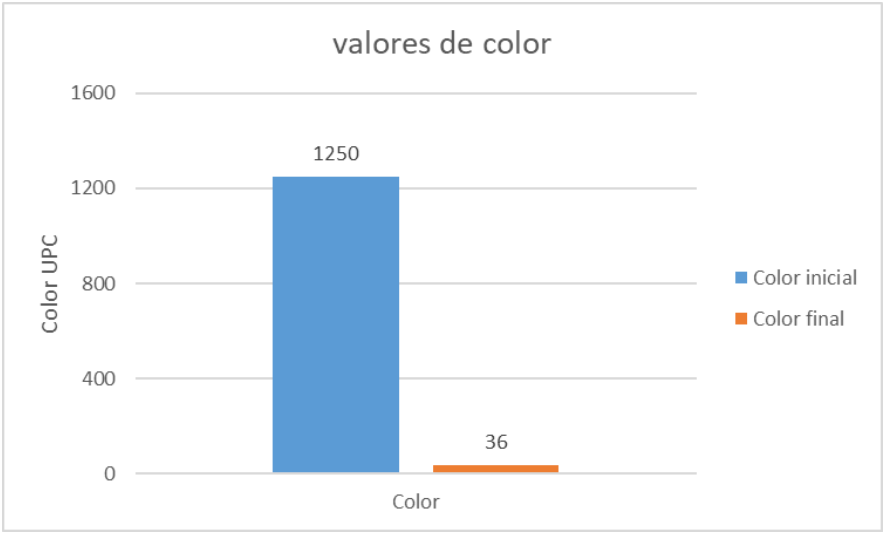


Ilustración 68. Valores de color en la prueba de laboratorio 2

En la Ilustración 70 se muestran los valores para la característica del color en unidades de UPC medidas para la muestra analizada, se detalla la reducción en los valores de color presentes desde los 1250 hasta los 36, esta reducción muestra la capacidad del proceso de evaporación al vacío de reducir las características presentes en la muestra, pero se mantiene por fuera del rango aceptable de aguas para consumo humano de la resolución 2115 de 2007.

En la Ilustración 71 se aprecia la diferencia en la muestra analizada (Izquierda) y la muestra potabilizada mediante el proceso de evaporación al vacío, en cuanto al color se evidencia una marcada diferencia en las 2 muestras siendo la muestra sin potabilizar de un color más amarillo esto presuntamente debido a las arenas/arcillas usadas para la realización de dicha muestra en contraste la muestra potabilizada presenta un color más cristalino debido a la eliminación de sustancias presentes en la muestra causantes del color inicial.



Ilustración 69. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 2; en a la Izquierda muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

Prueba de laboratorio 3

En la prueba número 3 se presentan las mismas condiciones de preparación de la muestra en el laboratorio además del mismo procedimiento de operación del prototipo de evaporador al vacío teniendo los datos de operación de la Tabla 30.

Tabla 30. Datos de operación para la prueba de laboratorio 3

Prueba #3		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:00	min
Turbiedad inicial	416	UNT
Color inicial	1425	UPC

los valores iníciales de turbiedad y color presentes en la muestra 3 aún se mantienen elevados desde valores de 416 UNT para turbiedad inicial y 1425 UPC para los valores de color inicial.

En la Tabla 31 se observan los datos obtenidos en la prueba 3 luego de realizada la potabilización mediante el proceso que se ha realizado en la muestra anteriores obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 31. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 3

Datos obtenidos		
Turbiedad final	2,25	UNT
Color final	28	UPC

En la Ilustración 72 se presentan los valores de turbiedad obtenidos para la muestra 3 analizada en el laboratorio, se evidencia nuevamente la reducción de los valores de turbiedad presentes inicialmente en el agua desde los 416 UNT hasta los 2,25 UNT, manteniéndose una reducción importante de las características iníciales de la muestra, aunque aún se mantienen los valores finales de turbiedad fuera del rango aceptable para agua de consumo establecidos en la resolución 215 de 2007.

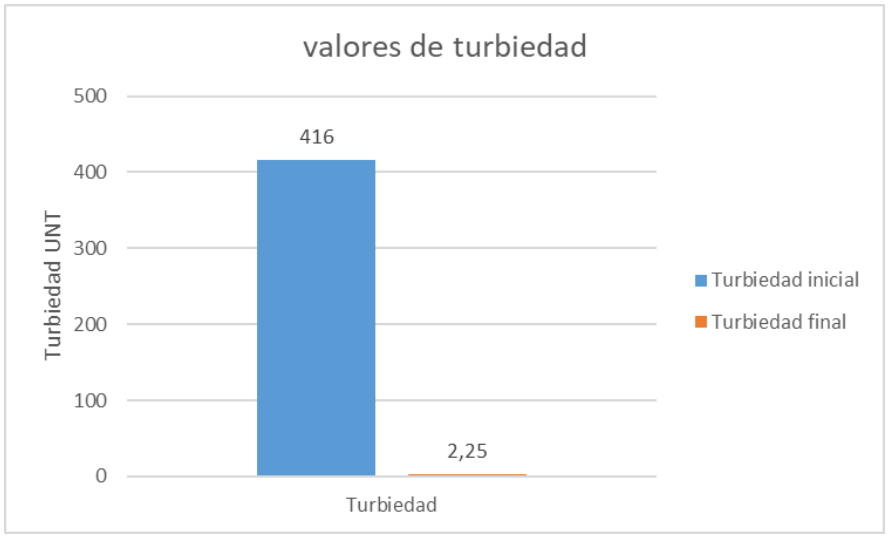


Ilustración 70. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 3

Los valores para el color presente en la muestra se observan en la Ilustración 73 donde se presente una reducción importante en esta característica como se ha presentado en las muestras analizadas anteriormente, el valor inicial presentado de color fue de 1425 UPC y se logró reducir significativamente hasta los 28 UPC.

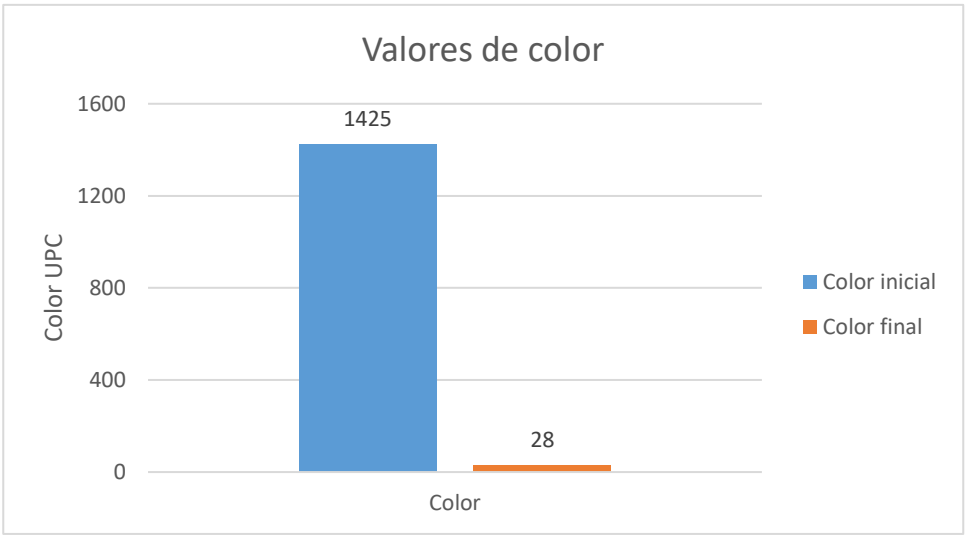


Ilustración 71. Valores de color en la prueba de laboratorio 3

El valor final obtenido para el color se mantiene aún fuera del valor recomendado para consumo humano establecido en la norma que recomienda un valor máximo de 15 UPC, esta diferencia entre los valores obtenidos y la normatividad colombiana puede deberse a factores internos del proceso realizado, así como la forma en la que se prepara la muestra analizada debido a que la arena/arcilla usada para simular los valores de turbiedad y color pueden ser de difícil eliminación.



Ilustración 72. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 3; a la Izquierda muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

En la Ilustración 74 se observa la diferencia en cuanto a la calidad de la muestra analizada, la muestra inicial (izquierda) presente como en las anteriores muestras una tonalidad más amarilla esto por la arena/arcilla usada en la preparación de la muestra mientras que la muestra obtenida después de realizado el proceso de evaporación al vacío se diferencia claramente por el color más cristalino obtenido después de la eliminación de gran parte de los elementos que causan el color y la turbiedad en la muestra.

Prueba de laboratorio 4

La prueba 4 se realiza siguiendo las mismas condiciones tanto en la preparación de la muestra a analizar con la operación del prototipo obteniendo los datos observados en la Tabla 32 donde la muestra analizada aun presente valores altos de turbiedad y color.

Tabla 32. Datos de operación para la prueba de laboratorio 4

Prueba #4		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	20:00	min
Turbiedad inicial	346	UNT
Color inicial	1620	UPC

Los datos obtenidos después de realizado el proceso operación del prototipo en la muestra 4 se observan en la Tabla 33, en este se observa que los valores obtenidos cumplen con la normatividad para aguas de consumo humano de la resolución tanto en color como turbiedad, estos valores obtenidos se presumen que son debido a que la arena/arcilla usada presentaba unas características más propicias para la eliminación de las sustancias presentes en el agua de muestra.

Tabla 33. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 4

Datos obtenidos		
Turbiedad final	0,84	UNT
Color final	7	UPC

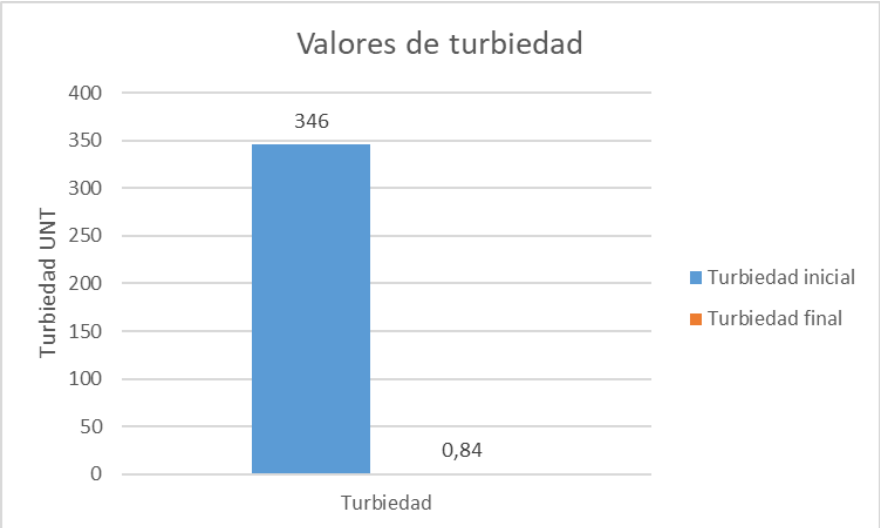


Ilustración 73. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 4

En la Ilustración 73 se detallan los valores obtenidos en la prueba número 4, se observa la disminución de los valores de turbiedad en la muestra analizada desde una turbiedad inicial de 346 UNT hasta los 0,84 UNT lo cual corresponde a un valor aceptable dentro del parámetro de turbiedad establecido en la normatividad colombiana el cual establece que un agua de consumo humano deberá tener un valor inferior a 2 UNT.

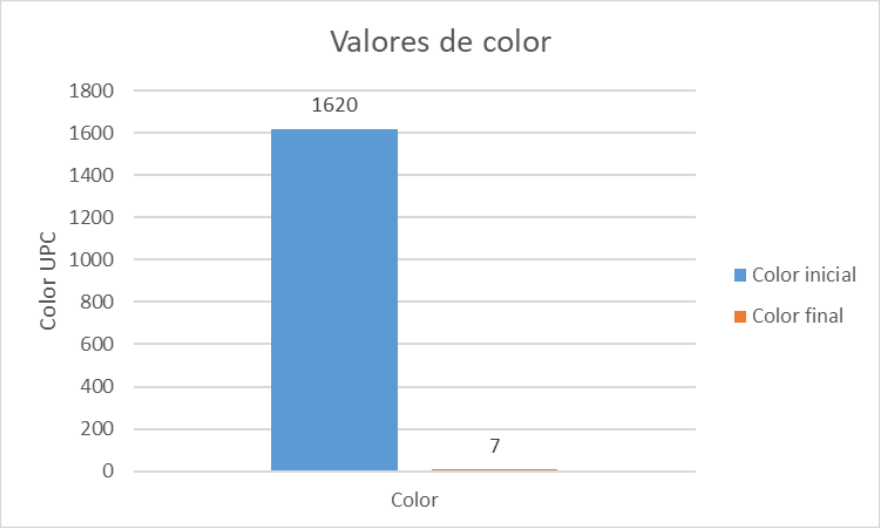


Ilustración 74. Valores de color en la prueba de laboratorio 4

En la Ilustración 74 se encuentran los valores obtenidos para la característica del color presente en la muestra analizada número 4 donde se observa una disminución en este parámetro desde el valor inicial de 1620 UPC hasta las 7 UPC que representa valor aceptable en aguas para consumo humano inferior a las 15 UPC que la normatividad establece como valor aceptable para el color analizado en aguas de consumo humano.



Ilustración 75. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 4; a la Izquierda muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

La Ilustración 77 presenta visualmente las muestras analizadas donde se observa nuevamente como la muestra sin potabilizar (izquierda) presenta unas características no propicias para el consumo humano con una tonalidad amarilla como se ha presentado en las muestras anteriores no obstante para la muestra potabilizada presenta unas características más propias en aguas para consumo humano con una tonalidad más cristalina.

Prueba de laboratorio 5 (Sector del hospital)

Para la realización de las siguientes muestras se optó por tomar muestras de agua de un entorno natural con el fin de medir el comportamiento del prototipo con valores de turbiedad y color acordes a los encontradas en ambientes más naturales y no generados artificialmente como se realizó anteriormente, en la Ilustración 78 se observa la zona donde se tomó la muestra número 5 la cual corresponde al área cerca del hospital de la ciudad de Pamplona Norte de Santander.



Ilustración 76. Zona de toma de muestra sector del hospital

Los datos obtenidos para los valores de turbiedad y color, así como las condiciones de operación usadas para el análisis de la muestra número 5 se detallan en la Tabla 34, en esta se observa que el valor inicial para la turbiedad en la muestra fue de 23,4 UNT, siendo este un valor inferior a los obtenidos para las muestras anteriores que fueron realizadas artificialmente así mismo el valor del color inicial se encuentra por debajo de los analizados en las muestras anteriores siendo de 199 UPC el obtenido para la muestra 5.

Tabla 34. Datos de operación para la prueba de laboratorio 5

Prueba #5		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	15:45	min
Turbiedad inicial	23,4	UNT
Color inicial	199	UPC

Los valores para el color y turbiedad obtenidos para la muestra 5 después de realizado el proceso de potabilización mediante evaporación al vacío se detallan en la Tabla 35.

Tabla 35. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 5

Datos obtenidos		
Turbiedad final	1,84	UNT
Color final	5	UPC

Los valores finales obtenidos en la muestra 5 para turbiedad y color fueron de 1,84 UNT y 5 UPC respectivamente, estos valores se encuentran dentro del rango de valores aceptables para aguas de consumo humano establecidos en la resolución 2115 de 2007.

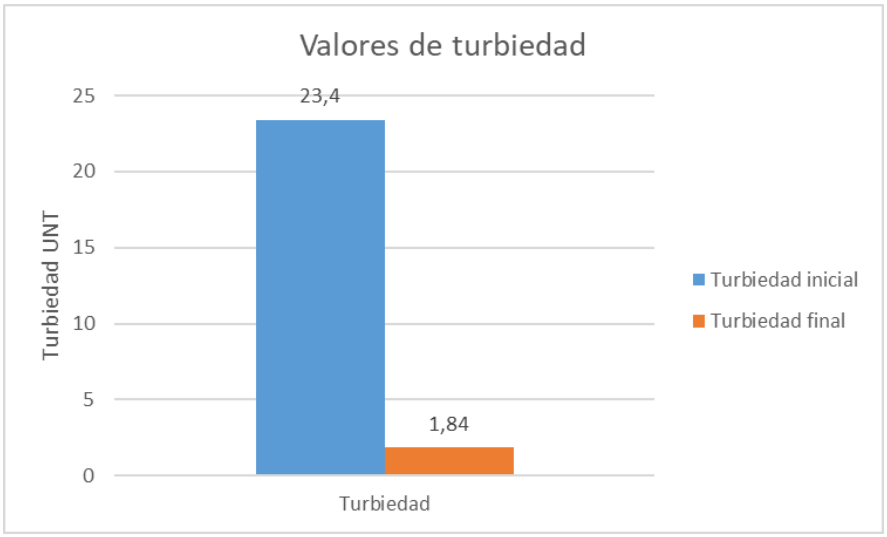


Ilustración 77. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 5

En la Ilustración 77 se encuentran graficados los valores de turbiedad de la muestra obtenidos en la prueba 5 donde se observa la reducción de los valores de turbiedad inicial desde los 23,4 UNT hasta los 1,84 UNT.

De igual manera en la Ilustración 80 se observa la reducción de los valores obtenidos para el color presente en la muestra número 5 donde se presenta una reducción del color desde los 199 UPC hasta las 5 UPC.

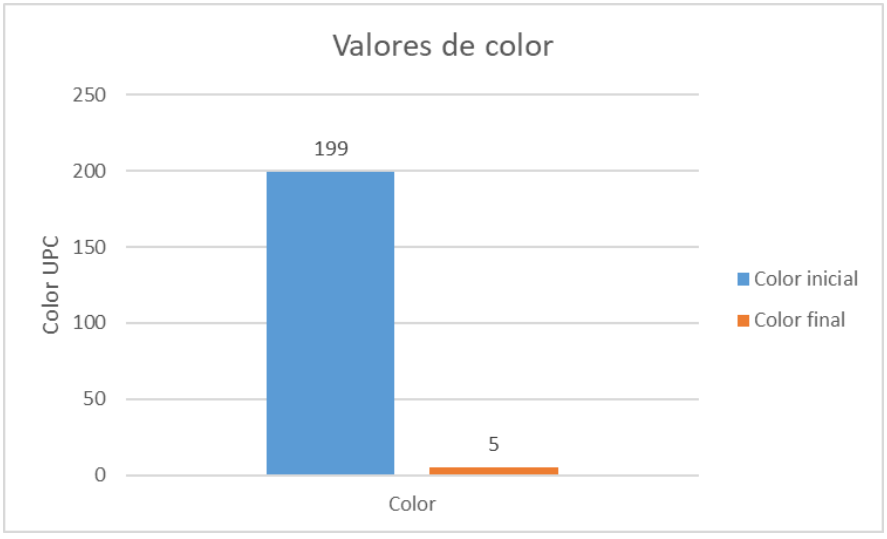


Ilustración 78. Valores de color en la prueba de laboratorio 5

La reducción presentada en las características de la muestra tanto en color como en turbiedad evidencian una mejora en la efectividad para eliminar sustancias causantes de los valores iníciales de turbiedad y color en la muestra en aguas con características de bajas turbiedades y colores iníciales, los valores obtenidos en la muestra obtenidas mediante el proceso de evaporación cumplen con la resolución 2115 de 2007 para las características analizadas.

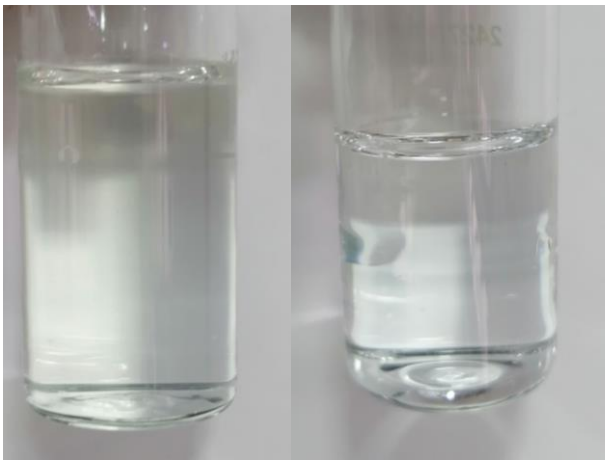


Ilustración 79. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 5; lado Izquierdo muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

En la Ilustración 81 se observa las diferencias entre la muestra a tratar (izquierda) y la muestra potabilizada (derecha), se observa una leve diferencia, aunque visualmente se presenta una dificultada para establecer un criterio de potabilización de manera visual siendo necesario instrumento de medición para la determinación del grado de potabilización de la muestra tratada.

Prueba de laboratorio 6 (sector plazuela Almeida)

Para la realización de la prueba de laboratorio número 6 la muestra fue tomada del sector aledaño a la plazuela Almeida como se muestra en la Ilustración 82.



Ilustración 80. Zona de toma de muestra sector plazuela Almeida

Los valores iníciales de turbiedad y color registrados para la muestra en el sector de la plazuela Almeida se registraron en la Tabla 36 así como las condiciones de operación del prototipo en el laboratorio, los valores obtenidos de turbiedad inicial en la muestra fueron de 6,93 UNT y para el color se registró un valor de 71 UPC considerándose una muestra relativamente limpia en cuanto a los valores de turbiedad, aunque presente un valor de color ligeramente alto.

Tabla 36. Datos de operación para la prueba de laboratorio 6

Prueba #6		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	2	L
presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	19:45	min
Turbiedad inicial	6,93	UNT
Color inicial	71	UPC

Los valores de turbiedad y color final obtenidos después de realizado el proceso de potabilización con la muestra 6 se registraron en la Tabla 37 donde se observa que el valor final de turbiedad obtenido fue de 1,24 UNT y para el color final fue de 13 UPC.

Tabla 37. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 6

Datos obtenidos		
Turbiedad final	1,24	UNT
Color final	13	UPC

En la Ilustración 83 se observa la reducción de los valores de turbiedad de la muestra número 6 desde el valor inicial de 6,93 UNT hasta los 1,24 UNT, se observa una reducción en los valores de turbiedad que cumplen con los valores aceptables para la normatividad colombiana.

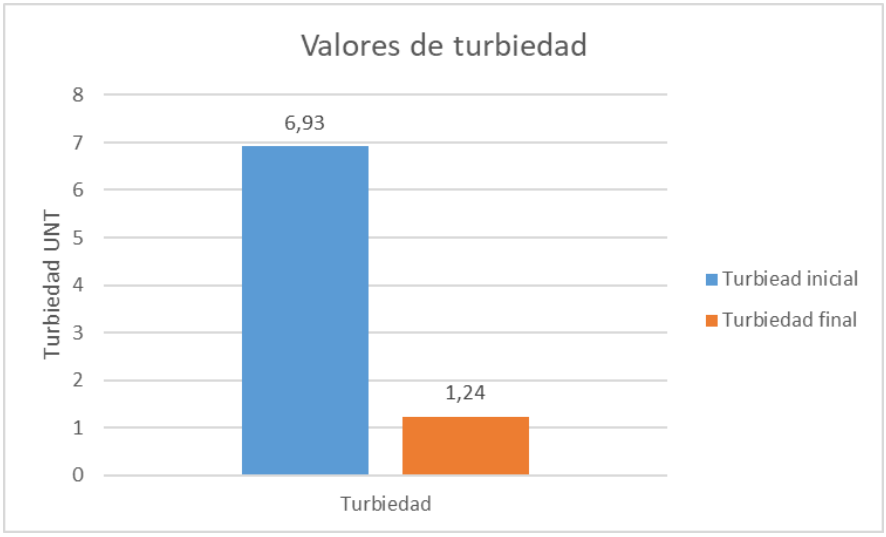


Ilustración 81. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 6

En la Ilustración 84 se observa la disminución del valor de color presente en la muestra desde las 71 UPC hasta las 13 UPC presentes en la muestra después del proceso de potabilización mediante evaporación al vacío, manteniéndose los valores de color por debajo de los valores aceptable para normatividad colombiana.

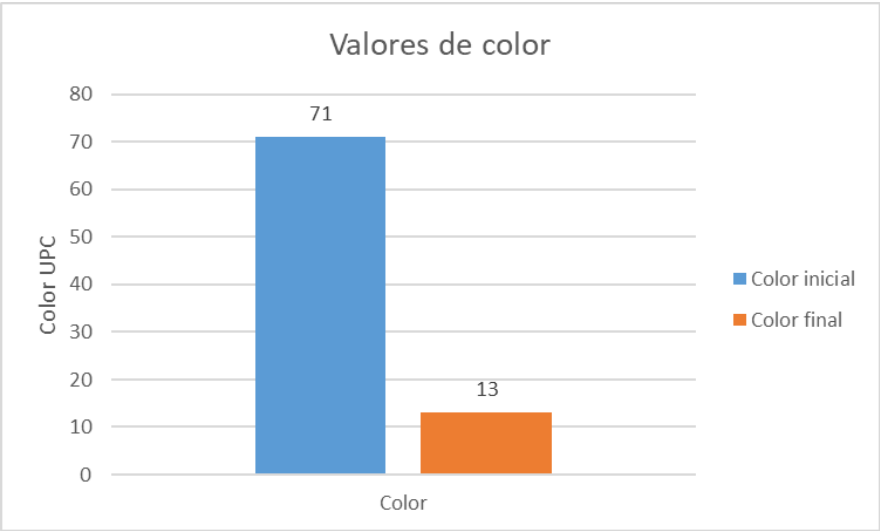


Ilustración 82. Valores de color en la prueba de laboratorio 6



Ilustración 83. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 6; lado Izquierdo muestra de agua cruda; derecha muestra de agua

En la Ilustración 85 se comparan visualmente la muestra cruda obtenida en la zona de muestreo (izquierda) y la muestra final después del proceso de potabilización, se evidencia una dificultad nuevamente para determinar visualmente alguna diferencia en cuanto a las características fisicoquímicas antes y después del proceso realizado, esto debido a que las condiciones iníciales en la muestra presentan valores relativamente bajos de turbiedad y color.

Prueba de laboratorio 7 (sector planta de tratamiento Cariongo)

En la prueba de laboratorio número 7 se tomó una muestra en el sector de la planta de tratamiento de aguas Cariongo más específicamente en la cámara de recepción antes de la canaleta Parshall como se observa en la Ilustración 86.



Ilustración 84. Zona de toma de muestra sector planta Cariongo

En la Tabla 38 se muestran los datos obtenidos para turbiedad y color inicial de la muestra analizada, así como los valores de operación del prototipo.

Tabla 38. Datos de operación para la prueba de laboratorio 7

Prueba #7		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	2	L
presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	21:25	min
Turbiedad inicial	21	UNT
Color inicial	65	UPC

En la Tabla 39 se registraron los datos obtenidos para la turbiedad y el color después de realizado el proceso de potabilización con el prototipo de evaporador al vacío, se obtuvo un valor de turbiedad final de 0,97 UNT y un valor para el color de 12 UPC.

Tabla 39. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 7

Datos obtenidos		
Turbiedad final	0,97	UNT
Color final	12	UPC

En la Ilustración 87 se detalla la reducción presentada en las características iniciales de la muestra número 7 después de realizado el proceso de potabilización, en cuanto a los valores de turbiedad se presentó una reducción de dicha característica desde los 21 UNT hasta los 0,97 UNT, dando como resultado un valor de turbiedad final aceptable dentro del rango de turbiedad permitido por la resolución 2115.

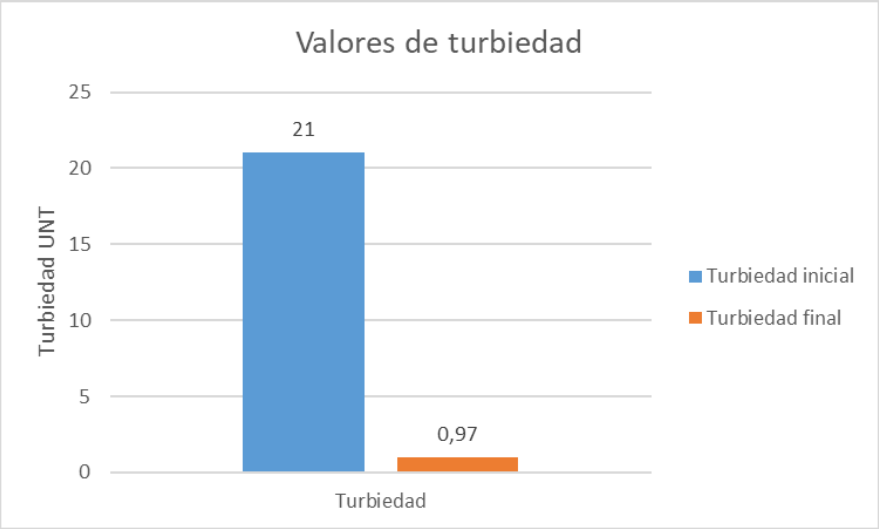


Ilustración 85. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 7

Para la característica del color analizada en la muestra número 7 se observa en la Ilustración 88 la reducción en los valores presentes inicialmente en la muestra, los valores iníciales obtenidos para el color se registraron en 65 UPC mientras la muestra tratada presento un valor de color en 12 UPC, la reducción presentada en el valor de color de la muestra analizada cumple con lo establecido para el color en la resolución 2115 de 2007.

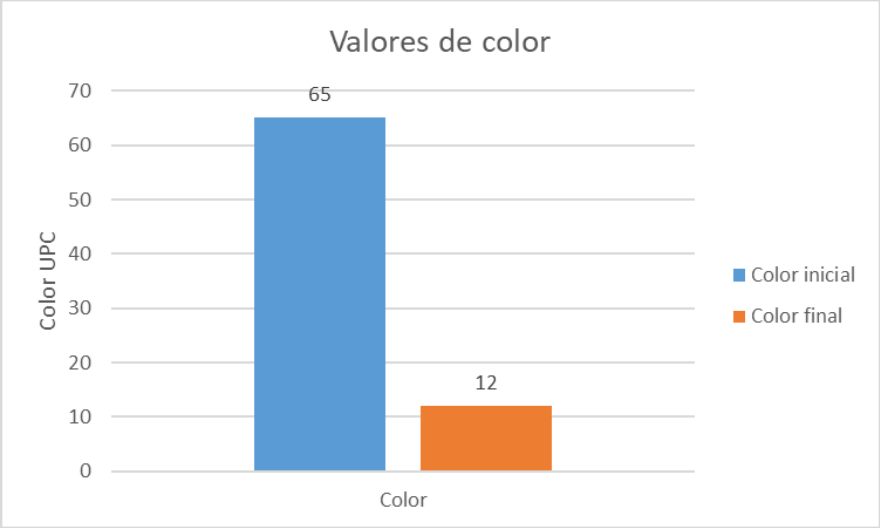


Ilustración 86. Valores de color en la prueba de laboratorio 7

En la Ilustración 89 se observa las muestras analizadas en la prueba número 7 antes y después del proceso de potabilización, en la muestra de agua cruda (izquierda) se observa una ligera tonalidad presente debido a las partículas causante del color y turbiedad en la muestra, no obstante, en la muestra tratada (derecha) se observa una tonalidad más cristalina por la eliminación de las partículas mediante el proceso de evaporación al vacío.



Ilustración 87. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 7; a la Izquierda muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

Prueba de laboratorio 8 (sector estación de policía)

La muestra analizada en la prueba 8 fue tomada el sector de la estación de policía de Pamplona Norte de Santander como se evidencia en la Ilustración 90.



Ilustración 88. Zona de toma de muestra sector estacón de policía

Los datos iníciales de la muestra usada en la prueba número 8 se detallan en la Tabla 40, los valores para turbiedad y color iníciales de la muestra se establecieron en 2,65 UNT y 30 UPC respectivamente.

Tabla 40. Datos de operación para la prueba de laboratorio 8

Prueba #8		
Intercambiador calor	Recirculado	
volumen de control	2	L
Presión de trabajo	-0,7	bar
Temperatura de trabajo	50	°C
Tiempo de trabajo	20:33	min
Turbiedad inicial	5,65	UNT
Color inicial	30	UPC

En la Tabla 41 se detallan los valores obtenidos para turbiedad y color en la muestra analizada, el valor de turbiedad final obtenido fue de 0,97 UNT y para el color el valor obtenido fue de 12 UPC, estos valores se mantienen en el rango aceptable para aguas de consumo humano de la resolución 2115 de 2007.

Tabla 41. Datos obtenidos en la prueba de laboratorio 8

Datos obtenidos		
Turbiedad final	0,97	UNT
Color final	12	UPC

En la Ilustración 91 se detalla la reducción de los valores de turbiedad inicial en la muestra analizada, se observa una reducción en la turbiedad de 5,65 UNT hasta los 0,97 UNT, los valores finales de turbiedad obtenidos cumplen con los parámetros establecidos en la normatividad colombiana.

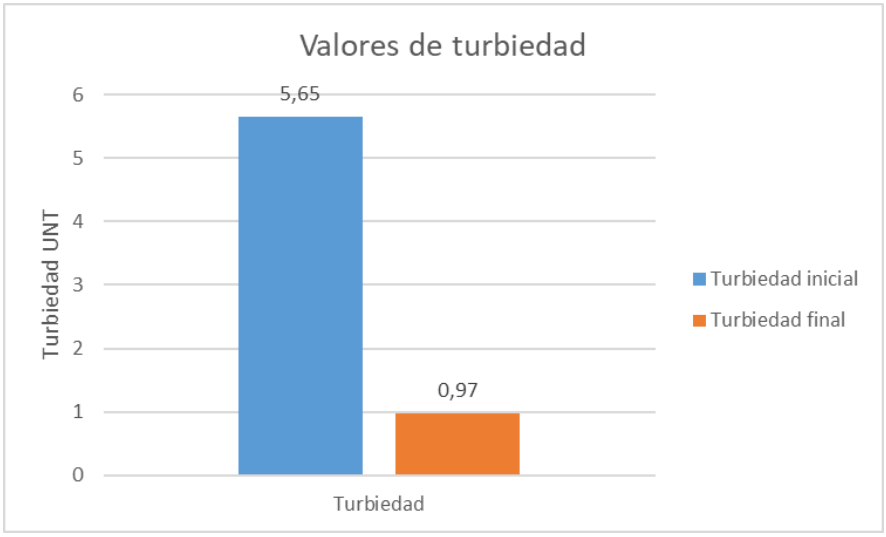


Ilustración 89. Valores de turbiedad en la prueba de laboratorio 8

Los valores obtenidos para el color se detallan en la Ilustración 92, se observa la reducción presente en los valores de color obtenidos en la muestra siendo en el valor inicial de 30 UPC y el valor final de 12 UPC, el valor final obtenido se mantiene dentro de los valores aceptables establecidos en la normativa para aguas de consumo humano.

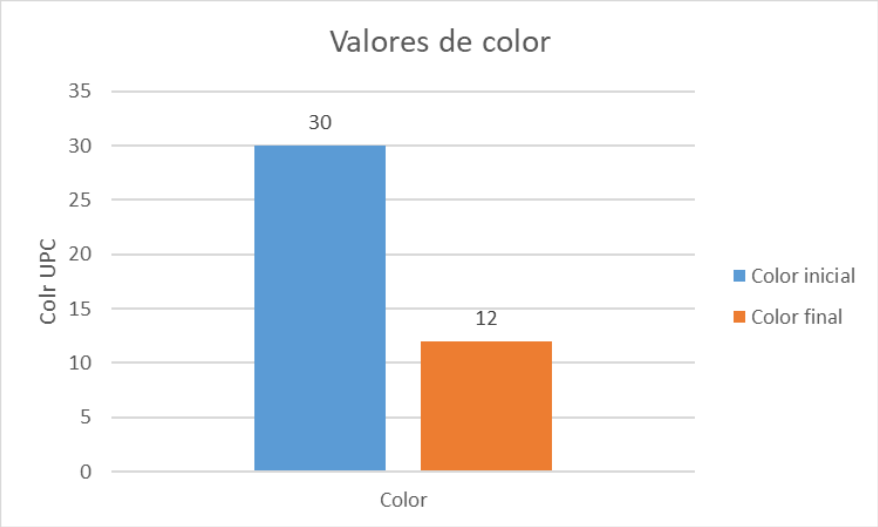


Ilustración 90. Valores de color en la prueba de laboratorio 8

En la Ilustración 93 se detalla visualmente la muestra analizada antes y después del proceso de evaporación al vacío, la muestra de agua cruda analizada (izquierda) presenta visualmente una tonalidad clara debido al bajo valor de turbiedad, pero presenta una ligera tonalidad en comparación a la muestra tratada (derecha) que presenta un color más cristalino por la reducción de los valores de turbiedad y color presentes en la muestra inicialmente.

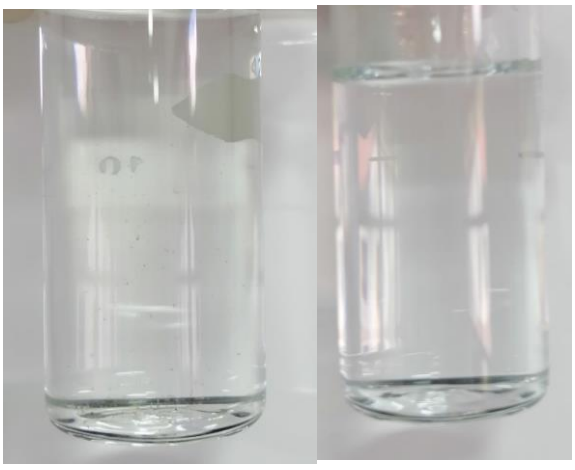


Ilustración 91. Muestras analizadas en el laboratorio para la prueba 8, lado Izquierdo muestra de agua cruda; derecha muestra de agua potabilizada

Tabla 42. Resumen de los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio

# Prueba	Datos obtenidos		Resolución 2115-2007		Cumplimiento
	Turbiedad final (UNT)	Color final (UPC)	Turbiedad (UNT)	Color (UPC)	
1	3	22	< 2	< 15	No
2	3,02	36			No
3	2,25	28			No
4	0,84	7			Si
5	1,84	5			Si
6	1,24	13			Si
7	0,97	12			Si
8	0,97	12			Si

En la Tabla 42 se encuentra un resumen detallado de los datos obtenidos para cada una de las pruebas realizadas en el laboratorio, en esta se observa el comportamiento general de los resultados destacando los valores de turbiedad final más bajos que estuvieron en 0,84 y 0,97 UNT para las pruebas número 4, 7 y 8 respectivamente, en cuanto al color se aprecia que los valores más bajos obtenidos están en los rangos 5 y 7 UPC para las pruebas 5 y 4 respectivamente, estos valores obtenidos se encuentran dentro del rango permitido por la resolución 2115 de 2007 la cual remarca que para aguas de consumo humano los valores de turbiedad deben estar por debajo de 2 UNT y en cuanto al color estos no deben presentar valores superiores a 15 UPC.

Sin embargo, se observa que para las pruebas 1, 2 y 3 los valores obtenidos no cumplen los rangos permitidos en la normatividad encontrándose los valores de turbiedad por encima de 2 UNT y los valores de color superiores a los 20 UPC.

Dentro de las pruebas realizadas se observa que las 3 primeras pruebas son las que presentan los mayores valores obtenidos tanto en color como turbiedad presentados un incumplimiento de la normatividad, estas pruebas también coinciden con las realizadas artificialmente en el laboratorio mezclando agua con arenas/arcillas siendo este un factor a tener en cuenta respecto a los valores obtenidos que incumplen la norma colombiana esto conforme a que las pruebas realizadas con aguas obtenidos de un ara natural (rio pamplonita) y que fueron analizadas en las mismas condiciones de operación con el prototipo de evaporador al vacío si presentaron valor aceptables dentro del rango de la normatividad colombiana.

En la Tabla 43 se encuentran registrados los valores de turbiedad inicial y final obtenidos en cada prueba además del cálculo del porcentaje de remoción presentado en cada prueba, presentándose según las pruebas realizadas altos porcentajes de remoción variando desde el 82% hasta los 99% con una remoción promedio del 93% siendo estos valores muy aceptables en un proceso de potabilización.

Tabla 43. Porcentaje de remoción de turbiedad en las pruebas de laboratorio

# Prueba	Datos obtenidos		% Remoción
	Turbiedad inicial (UNT)	Turbiedad final (UNT)	
1	154	3	98,05
2	352	3,02	99,14
3	416	2,25	99,46
4	346	0,84	99,76
5	23,4	1,84	92,14
6	6,93	1,24	82,11
7	12	0,97	91,92
8	5,65	0,97	82,83
		Promedio remoción	93,18

En la Tabla 44 se encuentran detallados los valores obtenidos para la características del color presentes en cada prueba, en ella se observa que para las pruebas realizadas artificialmente en el laboratorio dichos valores de color son elevados variando desde los 590 UPC hasta los 1620 UPC así mismo en cuento a los porcentajes de remoción es en estas mismas pruebas que se presentan los mayores porcentajes obteniéndose valores en los rangos de 96% a 99%, esto muestra la efectividad del proceso de evaporación en aguas con elevados valores de color que pueden ser causados por partículas en el agua demostrando un elevado grado de efectividad, no obstante aunque el grado de remoción es alto el proceso en estas pruebas no redujo los valores finales de color dentro del rango aceptable para aguas de consumo humano.

En las pruebas realizadas con agua obtenidas en diversas zonas del rio Pamplonita se presentaron valores más bajos de color en los rangos de los 199 UPC hasta los 30 UPC, pero se observan que los porcentajes de remoción del color en dichas pruebas baja por debajo del 90% llegando hasta los 60% en la prueba 8 esto debido que al presentar menores valores de color la

reducción de elementos causantes de estos valores de color debe ser menos pues las aguas presentes en las zonas de muestreo contenían menor número de partículas que causaran un elevado valor en las mediciones haciendo que la necesidad de eliminarlas para cumplir la norma sea menor dando valores de remoción de color por debajo incluso del 80%.

En cuanto al promedio general de remoción para el color presente en las pruebas realizadas este se mantuvo por encima del 80% estando en un 87,78% siendo un valor aceptable para el proceso de potabilización de aguas mediante la evaporación al vacío.

Tabla 44. Porcentajes de remoción de color en las pruebas de laboratorio

# Prueba	Datos obtenidos		% Remoción
	Color inicial (UPC)	Color final (UPC)	
1	590	22	96,27
2	1250	36	97,12
3	1425	28	98,04
4	1620	7	99,57
5	199	5	97,49
6	71	13	81,69
7	43	12	72,09
8	30	12	60,00
		Promedio remoción	87,78

5. CONCLUSIONES

Según el trabajo realizado para el diseño de un evaporador al vacío se han presentado una serie de ecuaciones fundamentales que nacen a partir los aspectos teóricos analizados para el diseño de máquinas y equipos que surgen del análisis de balances de masa y energía en los componentes del prototipo sugerido, así como del análisis del comportamiento de los fluidos según condiciones de temperatura y presión determinadas.

En cuanto a los datos obtenidos de la operación del prototipo propuesto y diseñado a escala laboratorio se han obtenido resultados importantes sobre el funcionamiento de los evaporadores al vacío y su operación a escala laboratorio, se destaca los resultados obtenidos en las muestras realizadas para la potabilización de estas donde se encontró que de las 8 muestras realizadas 5 cumplieron con los estándares propuestos en la resolución 2115 de 2007 en cuento a los valores de turbiedad y color si bien las 3 muestras faltantes presentaron valores que no cumplían la norma los valores obtenidos no se encuentran muy alejados de los valores aceptables estos pudo ser debido a condiciones especiales durante el tratamiento de las muestras pues estas se corresponden con las muestras iniciales para la generación de valores de turbiedad y color mezclando agua y arena/arcilla.

Los valores finales de remoción de turbiedad obtenidos en las diferentes pruebas realizadas en el laboratorio mediante el prototipo de evaporador al vacío presentaron valores superiores al 80% superando el 90% en 6 de las 8 muestras analizadas y alcanzando una eficiencia promedio superior al 93%, de igual modo para la remoción del color se presentaron valores elevados de remoción en la mayoría de las pruebas, aunque si bien estos presentan menor porcentaje encontrando valores por debajo del 80% en 2 de las pruebas realizadas de forma general la remoción de color presento un promedio del 87% siendo un valor aceptable de eficiencia en la remoción del color presente en el agua de las muestras tratadas, esto demuestra el potencial de la evaporación al vacío para la potabilización de las aguas teniendo en cuenta las limitaciones presentadas en el prototipo en cuanto a los materiales y equipos usado en la construcción de este.

6. RECOMENDACIONES

Frente los datos y experiencias obtenidas en el desarrollo de la investigación teórica y las pruebas realizadas en el laboratorio con el prototipo propuesto se hacen las siguientes recomendaciones:

- Continuar con la investigación de los evaporadores al vacío para desarrollar un conocimiento más amplio y técnico.

- Desarrollar un proceso de mejora que contribuya al diseño del prototipo propuesto con el desarrollo de técnicas y métodos de experimentación para la obtención de mejores resultados a escala de laboratorio.

- Hacer uso de las tecnologías renovables especialmente en el área de los paneles solares para incorporarlos en el prototipo diseñado y suplir los requisitos de energía para el funcionamiento de los equipos eléctricos.

7. BIBLIOGRAFÍA

Banco Mundial. (10 de Marzo de 2015). *Banco Mundial*. Obtenido de https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2015/03/10/brasil-colombia-peru-paises-mas-agua-tienen-en-el-mundo#:~:text=En%20el%20listado%20de%20los,)%20y%20Per%C3%BA%20(octavo).

BBVA. (s.f.). *bbva.com*. Obtenido de https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/cuales-son-los-usos-del-agua-la-importancia-de-los-recursos-hidricos/

Cabrera Bermúdez, X., Fleites Ramírez, M., & Contreras Moya, A. M. (Septiembre de 2009). *Redalyc*. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/4455/445543760009.pdf

Cardoso, A. M. (16 de febrero de 2015). *scielo.org*. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/pdf/rmfe/v61n1/v61n1a7.pdf

Castro Montero, E. S. (1997). *Repositorio academico de la universidad de Chile*. Obtenido de https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/121384/Evaporadores.pdf?sequence=1&isAllowed=y

castro, D. F., Alejandra, Gustavo, & Bravo, l. J. (5 de Marzo de 2018). *Academia.edu*. Obtenido de https://www.academia.edu/36145845/PROPIEDADES_FISICAS_PUNTO_DE_EBULLICION_Y_PUNTO_DE_FUSION

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinamica*. Mc Graw Hill.

Chulluncuy Camacho, N. C. (16 de Junio de 2011). *Redalyc*. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/3374/337428495008.pdf

Gomez, S. M., & Botia, N. R. (2019). Diseño y construccion de un sistema de evaporacion al vacio con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avicolas. Bucaramanga, Colombia.

James R. Mihelcic, J. B. (2011). *Ingenieria ambiental fundamentos, sustentabilidad, diseño*. Alfaomega.

Jaramilllo, O. (20 de Noviembre de 2007). Intercambiadores de calor. Mexico.

Lorenzo-Acosta, Y. (2006). Estado del arte del tratamiento de aguas por coagulación-floculación. *ICIDCA*, 11.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingenieria quimica.* Mexico: McGRAW-HILL.

Ministerio de Desarrollo Económico Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico. (Noviembre de 2000). Obtenido de https://procurement-notices.undp.org/view_file.cfm?doc_id=16483

MINISTERIO DE LA PROTECCiÓN SOCIAL, MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. (22 de Junio de 2007). *Minsalud.gov.* Obtenido de https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/Resoluci%C3%B3n_2115_de_2007.pdf

Minsalud. (9 de Julio de 2015). *Minsalud.gov.* Obtenido de https://www.minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/VS/PP/SA/abc-agua.pdf

Minvivienda. (8 de Junio de 2017). resolucion 0330 de 2017. Bogota, Colombia.

Organizacion Mundial de la Salud. (21 de Marzo de 2022). Obtenido de https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water

Parra, J. A. (1981). Manual de tratamiento de aguas. Medellin, Colombia.

Rivas, W. A., & Bravo, G. L. (2015). *Potabilizacion del agua. Principios de diseño, control de procesos y laboratorio.* Bogotá: Universidad piloto de colombia.

Rojas, J. A. (1999). *Potabilizacion del Agua.* Alfahomega.

Salamanca, E. (2016). Tratamiento de aguas para el consumo humano. Manizales, Colombia.

Sánchez, M. L., Mendoza, E. L., & Méndez, J. T. (Junio de 2005). *accedacris.* Obtenido de https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/253/1/495.pdf

Silva Garavito, L. F. (s.f.). *Diseño de Plantas de Purificacion de agua.* Universidad Santotomas de Aquino.

Valencia, J. A. (Febrero de 2000). Teoria y practica de la purificacion del agua. (M. G. Hill, Ed.) Colombia.