

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PORTÁTIL DE TRATAMIENTO
DE AGUA**

FABIÁN ANDRÉS REYES RUEDA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PORTÁTIL DE TRATAMIENTO
DE AGUA**

FABIÁN ANDRÉS REYES RUEDA

**Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de
Ingeniero Mecánico**

Director

JORGE LUIS CHACÓN VELASCO

Ingeniero Mecánico, PhD

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

*Dedico este proyecto de grado a mis padres
y a mi hermana por ser mi guía y compañía durante
este camino.*

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermana por el apoyo durante la elaboración de este trabajo de grado.

Al profesor Jorge Luis Chacón por ser mi tutor y guía durante este proceso.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	22
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	22
1.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	23
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO	25
1.3.1 Objetivos generales	25
1.3.2 Objetivos específicos	25
1.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN	26
2. GENERALIDADES	29
2.1 HISTORIA TRATAMIENTO DEL AGUA	29
2.2 PROBLEMÁTICA ACTUAL.....	31
2.3 IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA VIDA	31
2.4 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA	33
2.4.1 Enfermedades de origen biológico-infeccioso.	33
2.4.2 Enfermedades producidas por agentes químicos	34
2.5 DEFINICIONES BÁSICAS	34
2.6. FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA.....	38
2.6.1. Aguas subterráneas.....	38
2.6.2. Aguas superficiales.....	39
3. SELECCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LA PLANTA	40
3.1 NORMATIVIDAD COLOMBIANA.....	40
3.2 PRUEBAS.....	41

3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO	46
3.4 SUBSISTEMAS	47
4. MATERIALES COMPUESTOS.....	51
4.1 DEFINICIÓN	51
4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS	52
4.3 POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO.....	53
4.3.1. Resina De Poliéster.	55
4.3.2. Fibra de vidrio.	55
4.4 PROCESO DE FABRICACIÓN PIEZA DE PRFV.....	56
4.5 PROPIEDADES DEL POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO ...	59
4.6 PERFIL	60
4.7 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA	61
5. PROCESO DE COAGULACIÓN.....	65
5.1 DEFINICIÓN	65
5.2 COAGULANTE	67
5.3 COLOIDE.....	67
5.4 QUÍMICA DE LA COAGULACIÓN.....	68
5.5 ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS	69
5.6 DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE	70
5.7 DOSIFICADOR	71
6. PROCESO DE IONIZACIÓN	74
6.1 DEFINICIÓN	74
6.2 IONIZACIÓN CON COBRE PLATA Y ZINC	74
6.3 PRINCIPALES SUSTANCIAS QUÍMICAS REDUCIDAS POR LOS EQUIPOS KDF	75
6.4 FUNCIONES DEL SISTEMA DE IONIZACIÓN	76

7. PROCESO DE FILTRACIÓN.....	78
7.1 DEFINICIÓN	78
7.2 FILTRACIÓN RÁPIDA	80
7.3 MEDIO FILTRANTE.....	80
7.4 FILTRO DE LECHO PROFUNDO	81
7.5 ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN FILTROS DE LECHOS PROFUNDOS	82
7.5.1 Tasa de filtración.....	83
7.5.2 Porosidad.....	83
7.5.3 Diámetro efectivo de la partícula.:.....	84
7.5.4. Esfericidad.	84
7.5.5 Número de Reynolds a través de las partículas.....	85
7.5.6. Factor de fricción a través de un medio granular	86
7.5.7 Ecuación de Ergun.:.....	86
7.6 RETROLAVADO	89
7.7 CRITERIOS DE DISEÑO.....	91
7.8 CÁLCULOS DEL FILTRO	92
7.9 SELECCIÓN DEL MEDIO FILTRANTE	93
7.10 GRANULOMETRÍA SELECCIONADA.....	94
7.10.1 Arena sílice..	94
7.10.2 Grava.:	95
7.11 PÉRDIDAS DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN	97
7.12 HIDRÁULICA Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE LAVADO	98
7.13 ANÁLISIS DE ESPESORES.....	101
 8. DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO	 103
8.1 DEFINICIONES BÁSICAS Y CÁLCULOS	103
8.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS SISTEMA HIDRÁULICO	108
8.3 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA TUBERÍA	111
8.3.1 Norma RDE para tuberías de PVC.	111

8.3.2 Codos, tes, adaptadores machos.	113
8.4 PÉRDIDAS DE TUBERÍAS.....	113
8.4.1 Pérdidas proceso de filtración.....	114
8.4.2 Pérdidas proceso retrolavado.	117
8.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA.....	118
 9. DESINFECCIÓN DEL AGUA.....	 120
9.1 DEFINICIÓN	120
9.2 TEORÍA DE LA DESINFECCIÓN	121
9.3 CLORACIÓN.....	122
9.4 CLORO DISPONIBLE EN EL MERCADO	123
9.4.1 Cloro gaseoso.....	123
9.4.2 Hipoclorito de sodio..	123
9.4.3 Hipoclorito de calcio.	124
9.5 REACCIONES QUÍMICAS DURANTE LA CLORACIÓN.....	124
9.5.1 Cloro libre disponible.	124
9.5.2 Cloro combinado.....	125
9.6 SELECCIÓN DEL TIPO DE CLORO A UTILIZAR EN LA PLANTA.....	127
9.7 DOSIFICACIÓN.....	127
9.8 NATURALEZA DE LA LUZ ULTRAVIOLETA (UV)	129
9.9 LUZ UV, GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN.....	131
9.10 PROPAGACIÓN DE LA LUZ UV	131
9.11 INACTIVACIÓN MICROBIANA POR LUZ UV	132
9.12 DEFINICIONES: INTENSIDAD UV, DÓ SIS UV Y DISTRIBUCIÓN DE LA DOSIS UV.....	 135
9.12.1 Intensidad UV.	135
9.12.2 Dosis UV.	135
9.13 RESPUESTA DE LOS MICROORGANISMOS EN DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA	 136
9.14 LÁMPARAS UV	137

9.15 SELECCIÓN DE LA LÁMPARA PARA LA PLANTA.....	140
10. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL	143
11. PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA.....	146
11.1 PREPARACIÓN DE FILTRO	146
11.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO	149
11.3 MANEJO DE LA VÁLVULA MULTIPORT	150
11.4 PRUEBAS.....	152
12. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROTOTIPO	164
12.1 COSTOS DIRECTOS	164
12.2 COSTOS INDIRECTOS.....	166
12.3 COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA.....	166
13. CONCLUSIONES	168
14. RECOMENDACIONES.....	170
BIBLIOGRAFÍA.....	172
ANEXOS.....	177

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Alternativas de solución	26
Tabla 2. Cuadro comparativo entre aguas superficiales y subterráneas	39
Tabla 3. Análisis microbiológico de la muestra 1	44
Tabla 4. Análisis físico y químico muestra 2	45
Tabla 5. Propiedades mecánicas del PRFV	59
Tabla 6. Tiempo de sedimentación para algunas partículas	66
Tabla 7. Dosificador de cloro y/o alumbre.....	72
Tabla 8. Reynolds laminar y turbulento lecho filtrante	85
Tabla 9. Factor de fricción laminar y turbulento lecho filtrante	86
Tabla 10. Características de algunos componentes de los lechos filtrantes	88
Tabla 11. Porosidad a incipiente fluidización	90
Tabla 12. Propiedades agua a T= 20°C y P=100 kPa	92
Tabla 13. Lecho típico de grava para sistema de drenaje de tuberías.....	96
Tabla 14. Características de los lechos filtrantes.....	97
Tabla 15. Pérdida en lecho filtrante	101
Tabla 16. Elementos del sistema hidráulico.....	109
Tabla 17. Características de la tubería	112
Tabla 18. Pérdidas totales en el proceso de filtración.....	116
Tabla 19. Pérdidas proceso de retrolavado	118
Tabla 20. Cloro libre, combinado y total.....	126
Tabla 21. Comparación de tipos de lámparas germicidas	137
Tabla 22. Características de la lámpara seleccionada.....	140
Tabla 23. Dosis UV necesaria para eliminar el 99,9% de los microorganismos ..	142
Tabla 24. Elementos del sistema eléctrico y de control	144
Tabla 25. Análisis microbiológico después del tratamiento.....	155
Tabla 26. Análisis físico y químico después del tratamiento	156

Tabla 27. Tabla comparativa análisis antes y después.....	157
Tabla 28. Costos directos	164
Tabla 29. Costos mano de obra.....	165
Tabla 30. Costos indirectos	166
Tabla 31. Costo total de la máquina	167

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Agua líquida.....	32
Figura 2. Fuente de agua superficial.....	42
Figura 3. Muestras de agua	42
Figura 4. Proceso de tratamiento de agua en la planta potabilizadora	48
Figura 5. Subsistemas de la planta portátil de tratamiento de agua	49
Figura 6. Render planta portátil de tratamiento de agua.....	50
Figura 7. Clasificación de los materiales compuestos	53
Figura 8. Fabricación de una pieza en PRFV	58
Figura 9. Perfil estructura de la planta	60
Figura 10. Diseño de la estructura en SolidWorks 2012	61
Figura 11. Análisis de tensiones vonMises	62
Figura 12. Campo de deformaciones de la estructura	63
Figura 13. Construcción de la estructura	64
Figura 14. Ensayo de jarras.....	70
Figura 15. Funcionamiento dosificador de sulfato de aluminio	72
Figura 16. Dosificador de sulfato de aluminio	73
Figura 17. Ionización cobre, plata y zinc.....	75
Figura 18. Ionizador cobre, plata y zinc	77
Figura 19. Esquema general de un lecho filtrante.....	82
Figura 20. Caracterización de un lecho filtrante.....	84
Figura 21. Parámetros para el diseño de lechos filtrantes	89
Figura 22. Arena sílice	95
Figura 23. Grava.....	96
Figura 24. Diagrama del filtro.....	97
Figura 25. Retrolavado	99
Figura 26. Solución CAE para las tensiones en el filtro	102

Figura 27. Gráfica de deformaciones.....	102
Figura 28. Principio de Bernoulli	104
Figura 29. Proceso de la planta	110
Figura 30. Proceso de retrolavado.....	111
Figura 31. Diámetros de tubería	112
Figura 32. Pérdidas en codos	116
Figura 33. Desempeño de la bomba.....	119
Figura 34. Espectro electromagnético	129
Figura 35. ADN y ARN.....	133
Figura 36. Absorbancia UV de las bases nitrogenadas	134
Figura 37. Absorbancia de algunos microorganismos	136
Figura 38. Lámpara UV de mercurio de baja presión	139
Figura 39. Selección de la lámpara UV.....	141
Figura 40. Tablero de control.....	143
Figura 41. Proceso de llenado de filtro	147
Figura 42. Introducción de grava	147
Figura 43. Introducción de arena	148
Figura 44. Sellado de filtro	148
Figura 45. Instalación del sistema hidráulico	149
Figura 46. Válvula multiport modo filtro.....	150
Figura 47. Válvula multiport hacia retrolavado.....	151
Figura 48. Puesta en marcha.....	152
Figura 49. Llenado de pastillas de cloro y del filtro	153
Figura 50. Adición de coagulante.....	153
Figura 51. Sistema de control	155
Figura 52. Comparación resultados antes y después del tratamiento	157
Figura 53. Bacterias mesofílicas antes y después del tratamiento	158
Figura 54. Coliformes totales antes y después del proceso.....	158
Figura 55. Coliformes fecales antes y después del proceso.....	159
Figura 56. pH antes y después del tratamiento	159

Figura 57. Color total antes y después del proceso	160
Figura 58. Turbiedad antes y después del proceso	160
Figura 59. Conductividad antes y después del proceso.....	161
Figura 60. Alcalinidad total antes y después del proceso	161
Figura 61. Dureza antes y después del proceso.....	162
Figura 62. Sistema toma de muestra	163

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Planos	178
ANEXO B. Resultados de laboratorio Labalime	200
ANEXO C. Características de la bomba	204
ANEXO D. Propiedades del perfil estructura	206

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA PORTÁTIL DE TRATAMIENTO DE AGUA*.

AUTOR: FABIÁN ANDRÉS REYES RUEDA**

PALABRAS CLAVES: Potabilización de agua, filtración, lámparas UV, ionización, cloración.

DESCRIPCIÓN:

El agua es un recurso invaluable, fuente de vida y salud. Su uso se hace necesario en todos los aspectos de la vida diaria de los seres humanos. Se sabe que una buena calidad en este producto está relacionada con el nivel de desarrollo de un país. Por medio de este proyecto de grado se busca diseñar y construir una planta portátil de tratamiento de agua de costo moderado que permita entregar una mejor calidad del líquido en zonas rurales donde el acceso a dicho producto es escaso.

Para ello, se hizo un análisis de las diferentes tecnologías existentes en el mercado para la potabilización del agua y se diseñó un prototipo que cuenta con las siguientes características: el sistema es alimentado por una bomba centrífuga que se encarga de succionar el fluido para incorporarlo al circuito, el proceso continua con el suministro del coagulante (sulfato de aluminio) que permite juntar las partículas coloidales en suspensión para generar cúmulos más grandes lo que facilita su filtración. A continuación el fluido atraviesa el ionizador electrolítico que se encarga de eliminar metales pesados y microorganismos. Luego el agua atraviesa el filtro de sílice y grava donde las partículas de tamaños superiores a los de la granulometría se quedan y no lo atraviesan de donde sale el agua clarificada que se termina de desinfectar con luz UV y cloración.

Al finalizar el proyecto se realizó un manual de manejo y uso de la planta portátil de tratamiento de agua.

* Proyecto de grado.

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Jorge Luis Chacón.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PORTABLE WATER TREATMENT PLANT*

AUTHOR: FABIÁN ANDRÉS REYES RUEDA**

KEY WORDS: water, potabilisation, filtration, ultraviolet light, ionization, chlorination

DESCRIPTION:

Water is an invaluable resource, source of life and health. Its use is necessary in all aspects of daily life of human beings. It is known that a good quality product is related to the level of development of a country. Through this degree project seeks to design and build a portable water treatment plant of moderate cost that allows delivering a better quality of the liquid in rural areas where access to the product is scarce.

To this end, it was made an analysis of the different existing market technologies for water purification and a prototype was designed with the following characteristics: the system is powered by a centrifugal pump that is responsible of sucking the fluid to incorporate it the circuit, the process continues with the adding of coagulant (aluminum sulfate) that allows to collect colloidal particles in suspension to generate larger clusters which facilitating filtering process. Then the fluid passes through the electrolytic ionizer which is responsible for removing heavy metals and microorganisms. Next, the water flows through the silica and gravel filter where particles which exceed the grain will not pass the filter bed where the water is clarified and later disinfected with UV light and chlorine.

At the end there was prepared a small manual for the management of portable water treatment plant.

* Work degree.

** Faculty of Physics-Mechanical Engineerings. School of Mechanical Engineering. Director Jorge Luis Chacón.

INTRODUCCIÓN

Desde la antigüedad los seres humanos se han asentado cerca de fuentes hídricas lo que les ha permitido desarrollarse. Sin embargo, aun cuando el agua es vital y necesaria para la vida de las personas y de todos los seres vivos, en ella habitan microorganismos que pueden afectar gravemente la salud de los que a diario la consumen. Es por ello que a lo largo de la historia de la humanidad, hombres y mujeres han mostrado interés por desarrollar diferentes métodos, técnicas y dispositivos que han permitido mejorar las condiciones físicas, químicas y microbiológicas para su uso y consumo.

El agua, si bien es un recurso que parece de fácil acceso en las ciudades, en zonas rurales no sucede lo mismo. Diariamente muchas personas mueren a causa de enfermedades relacionadas con una mala calidad en el producto, especialmente niños pequeños y ancianos. Es por ello de vital importancia crear dispositivos eficientes que permitan abastecer a grupos familiares que aunque tengan el recurso hídrico éste no presente una buena calidad.

El siguiente trabajo de grado tiene por objeto diseñar y construir una planta portátil de tratamiento de agua que permita abastecer familias en sitios apartados del país donde este recurso tenga una mala calidad. Para ello, el sistema cuenta con varios procesos que permiten la mejora en la calidad del recurso, entre ellos se encuentran en su orden: floculación, ionización con cobre-plata-zinc, filtración con sílice y grava, radiación con luz ultravioleta y finalmente cloración.

El presente trabajo comienza con la formulación del problema e identificación de la necesidad que necesita ser resuelta, para este caso particular, la necesidad es brindar agua potable en zonas donde no esté presente este recurso, con esto se

resuelven los problemas derivados de un consumo de agua de mala calidad como son las enfermedades de origen biológico-infeccioso. Con lo anterior, se establecen los objetivos específicos que se quiere tengan la planta de agua, como son su capacidad, sus procesos y los resultados esperados.

El estudio continúa con un análisis físico, químico y microbiológico de las fuente hídrica que se van a utilizar como abastecimiento. Esta es de tipo superficial. El desarrollo de este libro prosigue con el análisis a las diferentes tecnologías que se van a utilizar mencionadas en párrafos anteriores. El trabajo incluye los cálculos la selección y los planos del diseño de la planta.

Para finalizar el proyecto muestra la puesta en marcha de la planta, análisis microbiológicos, físicos y químicos después de procesada el agua, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y anexos.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El agua es una sustancia indispensable para la supervivencia de todas las formas de vida conocidas: hombre, animal y vegetal, es una molécula constituida por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. El agua abunda en la tierra. Se estima que $\frac{3}{4}$ partes (71%) de la superficie del planeta está constituida de este vital líquido.

Esta sustancia se encuentra en los tres estados de agregación de la materia: sólido, líquido y gaseoso. Pese a su abundancia no toda el agua que posee el planeta es apta para el consumo humano. Del total del agua del planeta el 97% se encuentra en los océanos y mares como agua salada. Tan sólo el 3% representa el agua dulce. De la anterior tan solo el 1% se encuentra en estado líquido, el resto, 2%, se encuentra en los polos, glaciares y en montañas de gran altitud.

El agua es imprescindible para la vida ya que es fuente de bienestar y de salud. Su calidad está directamente relacionada con el nivel de vida y con el nivel sanitario de un país. El agua es utilizada para un sin número de actividades entre las cuales se tienen la producción de alimentos, el bienestar del hombre, el crecimiento de las plantas, la industria, la construcción, entre otros. Es decir, se encuentra en todos los aspectos de la vida cotidiana de los seres humanos y la historia ha demostrado que las grandes civilizaciones de la antigüedad perduraron y se fortalecieron principalmente porque sus asentamientos eran cercanos a las cuencas de los ríos lo que les permitió desarrollar la agricultura y satisfacer sus necesidades nutricionales.

¿Cuáles son las regiones de Colombia que no tienen acceso al agua potable?

El agua de consumo humano se considera de gran calidad cuando es saludable y limpia; es decir, cuando no presenta microorganismos ni contaminantes a niveles capaces de afectar gravemente la salud de las personas que la consumen. En muchos países en desarrollo, como es el caso de Colombia, el acceso a agua potable es muy limitado principalmente en zonas rurales y apartadas del país donde niños y adultos contraen cientos de enfermedades relacionadas con una mala calidad del agua, muchos de los cuales fallecen al no poder recibir adecuado tratamiento médico.

Por lo anterior existe una necesidad que requiere ser satisfecha, la necesidad de agua potable, la necesidad de generar dispositivos que mejoren la calidad del agua y que sean accesibles a la población, de fácil funcionamiento, mantenimiento y del menor costo posible.

1.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Una gran parte de la población del mundo no tiene acceso a agua potable. De acuerdo con cálculos estimados por la UNICEF y la Organización Mundial de la Salud (OMS) en el año 2013 cerca de 768 millones de personas carecían de este líquido vital. Una mala calidad de este recurso origina cada año cientos de enfermedades y muertes en niños y adultos, afectando principalmente a los infantes menores de cinco años quienes son los más propensos y vulnerables a contraer enfermedades diarreicas relacionadas con esta carencia. Los datos sin lugar a duda son alarmantes ya que en el mundo 1400 niños fallecen a diario debido a esta problemática.

De acuerdo con el Censo realizado por el DANE durante el año 2005 la tasa de cobertura del agua potable en Colombia era del 83,2%, la cual demuestra un gran avance si se compara con los años anteriores. Sin embargo, sigue existiendo una brecha enorme entre las zonas rurales y urbanas ya que su cobertura es de 94,3% y 47,1% respectivamente. De acuerdo a datos de la misma fuente, existe también un déficit en el manejo de las aguas ya utilizadas debido a que la cobertura en el alcantarillado sólo alcanza el 73,1% acentuando un duro contraste entre áreas rurales y urbanas de 17,8% y 89,7% respectivamente.¹

Consumir agua potable genera un gran número de beneficios, entre ellos: una reducción significativa de enfermedades, principalmente del tipo diarreico, con esto también se reducen costos en tratamientos médicos y se evitan cientos de fallecimientos debido al consumo de agua en precario estado.

De acuerdo con un estudio realizado por la OMS por cada dólar invertido en agua y saneamiento se recuperarían entre 3 y 34 dólares los cuales podrían ser invertidos en salud, desarrollo social y económico.²

Colombia, país lleno de grandes cuencas hídricas, bañado por caudalosos ríos, rodeado por dos océanos y con grandes precipitaciones anuales se hace difícil creer que sea un país que pueda llegar a sufrir escasez de este líquido, pero la realidad es otra, e incluso ya se está viviendo. Según los escenarios calculados por el IDEAM, hacia el año 2050 en Colombia el 60% de los páramos habrá desaparecido, panorama escalofriante si se tiene en cuenta que las principales fuentes hídricas de la nación se forman en la cordillera de los Andes.

¹DANE. Censo 2005. [en línea] Consultado el: 5 de Mayo de 2014 Disponible en: www.dane.gov.co.

² ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Agua, saneamiento y salud. Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud [en línea]. Disponible en: http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/. Consultado el: 5 de Mayo de 2014

Lo anterior, hace evidente la necesidad de crear dispositivos destinados a mejorar la calidad del agua principalmente en zonas rurales donde su acceso y disponibilidad son limitados.

1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO

1.3.1 Objetivos generales

- Contribuir a la misión de la Universidad Industrial de Santander en la construcción, aplicación y divulgación de conocimientos; el desarrollo y la transferencia de tecnologías, mediante el diseño y la construcción de una planta portátil de tratamiento de agua para zonas rurales.

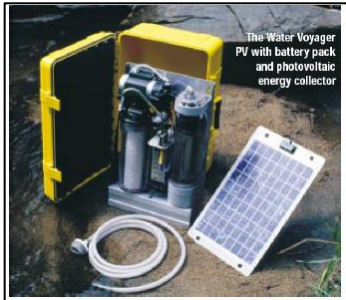
1.3.2 Objetivos específicos

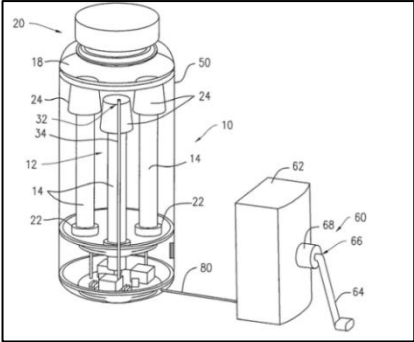
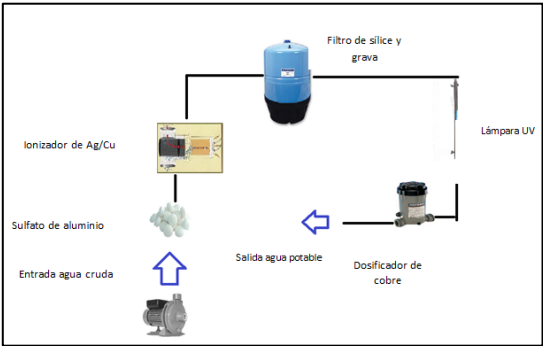
- Diseñar y construir un prototipo de planta portátil de tratamiento de agua que sea capaz de producir 500 litros/hora de agua potable; además que sea capaz de purificar aguas superficiales con turbiedad máxima de 40 UTN.
- Seleccionar las tecnologías a tratar, éstas son: filtración (sílice y arena), ionización cobre-plata, desinfección por lámparas UV, cloración, dosificación floculante.
- Realizar un pequeño manual de uso y manejo de la planta.

1.4 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN

Se plantean las siguientes alternativas para solucionar los objetivos mencionados anteriormente. En la tabla 1 se muestran los tres diseños; en esta se pueden ver los modelos, sus especificaciones y sus ventajas y desventajas. Una vez comparados se seleccionará la mejor alternativa.

Tabla 1. Alternativas de solución

DISEÑO	ESPECIFICACIONES	VENTAJAS (V) /DESVENTAJAS (D)
Diseño 1: Modelo planta potabilizadora de agua, desinfectada con rayos UV y alimentada por energía solar fotovoltaica Figura 1. Diseño 1  Fuente: http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2005/057245.pdf	Este proyecto busca explorar las siguientes tecnologías en el mismo orden de proceso: ✓ Filtración de cartucho. ✓ Filtro de carbono activado. ✓ Luz UV El filtro puede ser utilizado en lugares donde no haya energía eléctrica porque tiene un panel fotovoltaico	V. El sistema se podrá utilizar en lugares donde no hay acceso a la electricidad ya que cuenta con un sistema fotovoltaico y es bastante liviano. D. Bajos caudales, de tipo más “camping”, necesidad de desplazamiento, dependiente de las condiciones climatológicas, pocos procesos
Diseño 2: Modelo planta potabilizadora portátil con filtro, desinfección con rayos UV con un sistema adaptado para convertir energía cinética en eléctrica	Este proyecto busca explorar la desinfección del agua por medio de los rayos UV, para ello el sistema cuenta con unos tratamientos previos que permiten mejorar el nivel de turbidez del agua. Se utilizarán métodos de filtración que ayudarán a aumentar la	V. Puede ser utilizados donde no haya suministro de electricidad, es simple, ligero y de bajo peso. D. Necesidad de desplazamiento al lugar donde está el agua para utilizar, se necesita mucha investigación al ser

DISEÑO	ESPECIFICACIONES	VENTAJAS (V) /DESVENTAJAS (D)
Figura 2. Diseño 2  Fuente : https://www.google.com/patents/US20110104017?dq=portable+water+treatment&hl=es-419&sa=X&ei=EW1KVNeDEI67ggTX1YCYBg&ved=0CFUQ6wEwBg	efectividad de la luz UV. El sistema se podrá utilizar en lugares donde no haya acceso a la electricidad debido a que cuenta con un sistema adaptado para convertir energía cinética en energía eléctrica para alimentar las lámparas UV.	un proceso no convencional
Diseño 3: Planta portátil de tratamiento de agua con dosificación de floculante, ionización cobre plata, filtración, desinfección UV, cloro. Figura 3. Diseño 3 Fuentes:  www.todoagua.aqua-soft.com.mx , www.purificadoresdeagua.net , www.seicoonline.com , www.co.all.biz , www.clearwater-tec.com Modificada por el autor	En esta planta busca ampliar la capacidad del caudal de agua a tratar. Por medio de un ciclo el agua entra a través del sistema donde se le es agregado un floculantes (sulfato de aluminio), luego pasa a través de un ionizador de plata y cobre que elimina bacterias y algas del agua contaminada. A continuación pasa por el filtro de sílice y grava donde por medio de diferentes granulometrías el agua va eliminando los sólidos suspendidos hasta salir clarificada. Luego pasa a ser desinfectada por medio de una lámpara UV y finalmente es tratada por cloro para dejar un residuo de desinfectante por un tiempo.	Tienen diferentes métodos para tratar agua, se pueden manejar caudales altos, alta confiabilidad en el proceso, presentan métodos convencionales y no tan convencionales, tienen un bajo consumo de corriente y portátil, de bajo peso. D. Se requieren más procesos, mayor costo y necesita suministro de energía eléctrica.

De las alternativas mencionadas anteriormente se seleccionó la tercera por las siguientes razones:

Existen muchos parámetros que los consumidores tienen en cuenta al momento de adquirir un producto: que sea eficiente, económico, movable, que tenga una alta calidad y que sea confiable. El proyecto está tratando con agua potable por tal motivo se encuentra en juego la salud de los consumidores, por esto, el que sin duda genera más confianza al diseñador por su cantidad y calidad de los procesos es la opción número 3.

2. GENERALIDADES

Este capítulo aborda conceptos generales del agua y su tratamiento. Comienza con una breve historia del tratamiento de agua a través del tiempo. Luego se analiza la problemática actual de abastecimiento y los problemas de salud originados por el consumo de una mala calidad de este producto. Al final de este capítulo se hizo un glosario con algunas palabras que el autor considera hacen parte de la Ingeniería Ambiental y no son muy frecuentes en la Ingeniería Mecánica.

2.1 HISTORIA TRATAMIENTO DEL AGUA³

Asegurar y mantener un adecuado suministro de agua ha sido desde siempre una preocupación del ser humano. No es en vano que las civilizaciones más importantes de la antigüedad se hayan desarrollado cerca de las cuencas de los ríos, valles y lagunas. Esto debido a la necesidad esencial del hombre de obtener agua dulce para su consumo y uso en diferentes aspectos de su vida.

En un principio los tratamientos de agua que desarrollaron los antepasados estaban relacionados con un mejoramiento en las calidades estéticas del agua de beber. Es decir, se crearon métodos para mejorar el sabor y el olor del agua. De esto se tienen registros del año 4000 a.C. en donde la civilización griega recomendaba métodos de filtración, la utilización de la energía solar, métodos para colar y hervir el agua. Se dice que los egipcios tampoco se quedaron atrás, y

³ EXCEL WATER TECHNOLOGIES. La historia del tratamiento de agua de tomar. [en línea] Disponible en: http://www.excelwater.com/esp/b2c/about_7.php . Modificado por el autor. Consultado el : 5 de Mayo de 2014.

utilizaron una sustancia llamada alum para generar la suspensión de partículas que se asientan en el agua.

No fue hasta mucho tiempo después cuando los científicos encontraron la relación que existía entre una mala calidad del agua de consumo y las enfermedades que se presentaban en los seres humanos. Hacia el año de 1800, Louis Pasteur demostró que los microbios podrían transmitir enfermedades a las personas por medios como el consumo del agua.

Durante los siglos XIX y XX se empezó entonces a tomar conciencia no sólo por las calidades estéticas del agua sino por sus calidades microbianas. Es así que los científicos comprendieron que la turbidez no era un simple problema estético sino que también podría encubrir patógenos dañinos que podían traer efectos adversos a la salud.

Al tiempo que la filtración se iba desarrollando como método para resolver la turbidez, se comprobó la efectividad del cloro en la eliminación de virus, bacterias, y en general microorganismos dañinos para la salud. Con la utilización del cloro se redujo drásticamente el número de brotes de enfermedades a comienzos del siglo XX. La primera vez que se usó el cloro en una forma masiva fue en el año de 1908 en la ciudad de Jersey City, Nueva Jersey.

Con el desarrollo y mejoramiento de las tecnologías los países desarrollados comenzaron a establecer normativas que regulaban la calidad del agua tratada, es así como en el año de 1914 Estados Unidos por medio del Servicio de Salud Pública Estadounidense estableció una normatividad que medía la cantidad bacteriológica del agua tratada. Esta reglamentación se actualizó los años 1925, 1946 y 1962.

Con los años las normatividades de los diferentes países se endurecen y cada vez se controlan más los productos con los cuales son tratadas las aguas.

En la actualidad existen diversas formas de tratar agua, cada método presenta sus ventajas y desventajas y dependerá del diseñador y de los requisitos del consumidor la selección del mejor método a realizar.

2.2 PROBLEMÁTICA ACTUAL

Según la OMS cerca de 2,2 millones de personas mueren al año debido a enfermedades relacionadas con la diarrea, muchas de las cuales se podrían evitar si se practicaran métodos adecuados de higiene. La gran mayoría de los decesos son niños menores de 5 años en países en desarrollo. Un adecuado tratamiento de agua reduciría notablemente el número de muertos y enfermos.

2.3 IMPORTANCIA DEL AGUA EN LA VIDA

El agua es una sustancia indispensable para los seres vivos ya que sin ella no sería posible la vida. Al nacer los seres humanos son un 75% de agua. Es abundante también en el planeta ya que representa más del 70% de la corteza terrestre, se encuentra en océanos, mares, ríos, lagunas, glaciares, etc. Sencillamente el agua es el motor de la vida ya que nace de ella, es entonces, el fundamento de todo lo vivo.

Bajo condiciones normales, el ser humano pierde alrededor de dos litros de agua a diario mediante la eliminación de orina, al sudar, al respirar, hablar y a través de

la materia fecal. Por lo anterior se hace necesaria la ingesta mínima de esta cantidad para no tener problemas de salud. El agua es importante para la eliminación de toxinas del organismo, en el transporte de nutrientes y sirve como regulador de temperatura.

Además de utilizarla para beber, el agua se utiliza para un sin número de actividades, se requiere para la elaboración de los alimentos, el aseo personal, el riego de cultivos, en procesos industriales, para la generación de energía, etc. La figura 1 muestra el agua en su estado líquido.

Figura 1. Agua líquida



Fuente: Tratamiento de agua industrial residual y salina. Disponible en: <http://grupo-agua.com/blog/tag/tratamiento-de-aguas/>

2.4 IMPORTANCIA DE LA CALIDAD DEL AGUA⁴

A lo largo de la historia, el hombre ha recurrido a los cuerpos de agua para abastecerse de este recurso así como para eliminar sus propios desechos, lo que ha provocado que con el paso del tiempo la cantidad y tipo de residuos que se liberan en los cursos de agua se hayan incrementado y diversificado, al mismo tiempo que la calidad original del agua se ha degradado transformándose así en origen y vehículo de diversas enfermedades.

Básicamente, existen dos tipos de enfermedades relacionadas con el agua en función del tipo de elementos contaminantes presentes; las producidas por agentes biológico-infecciosos (microorganismos) que se manifiestan en forma rápida y las producidas por agentes químicos, que en general, tardan en manifestarse.

2.4.1 Enfermedades de origen biológico-infeccioso⁵. Los microorganismos causantes de las denominadas “enfermedades hídricas” provienen principalmente de las heces humanas o animales. La infección ocurre por el contacto entre el hombre y el agente infeccioso en alguna de las fases del ciclo del uso del agua, es decir, que puede presentarse durante las actividades cotidianas (bañarse, lavar, cocinar, etc.), las actividades agrícolas, durante la potabilización, o bien, al consumirse.

⁴ COMISIÓN NACIONAL DE AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. NOM-127-SSA-1-194. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007.

⁵ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. 1ed. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007. 329p.

La presencia de estos microorganismos en el agua tiene diversas causas entre las que se encuentran la falta de protección de las fuentes de abastecimiento, la contaminación biológica por infiltración de aguas negras al sistema de distribución, escurrimientos de agua contaminada hacia los mantos freáticos, las deficiencias en el acondicionamiento del agua, o bien, la falta de higiene de los usuarios, entre otras.

2.4.2 Enfermedades producidas por agentes químicos⁶. Estas enfermedades son provocadas por la ingesta de elementos y compuestos químicos que entran al agua por vías naturales o antropogénicas, y, dependiendo de la composición química, dosis y tiempo de exposición, provocan respuestas negativas de diversa magnitud por el organismo. Cuando dicha respuesta ocurre en forma inmediata (24 a 48 h después de la exposición) se denomina efecto agudo pero si ocurre después de un largo periodo (10 a 20 años) se debe a un efecto por exposición crónica.

2.5 DEFINICIONES BÁSICAS

Existe una amplia gama de terminología que se usará durante el desarrollo de este proyecto que sería bueno definirla antes de mencionarla. Así, se tienen las siguientes:

- ✓ Agua cruda: es aquella que aún no ha sido sometida a un proceso de tratamiento de agua, puede provenir de cualquier tipo de fuente, río, arroyo, lago, agua subterránea, agua lluvia, etc.
- ✓ Agua potable: es el agua que ha sido sometida a un proceso de tratamiento y que es apta para el consumo humano debido a que no presenta un riesgo para la salud humana.

⁶ Ibid. 329p.

- ✓ Bacilo: Es un tipo de bacteria que presenta tiene forma de bastón o vara. Se clasifican en bacilos Gram positivos y Gram negativos.
- ✓ Bacilo Gram negativo: son aquellas bacterias que no se tiñen de azul oscuro o violeta por la tinción de Gram, y lo hacen de un color rosado tenue, las Gram positivas sí lo hacen.⁷
- ✓ Bacterias mesofílicas: indican contaminación de tipo ambiental, proporciona información acerca del número total de bacterias viables, constituyendo un recurso valioso adicional para determinar el grado de exposición del agua a la contaminación por materia orgánica⁸
- ✓ Base nitrogenada: son compuestos orgánicos que están formados por dos o más átomos de nitrógeno.
- ✓ Cloro residual: cantidad de cloro que se deja en el agua potable para evitar ser re contaminada, se encuentra como una mezcla de hipoclorito y ácido hipocloroso.
- ✓ Coliformes fecales: Los coliformes fecales son todos los bacilos cortos que difieren del grupo coliforme total por su capacidad para crecer a una temperatura de entre 44 y 45 °C. Abarca los géneros Escherichia y parte de algunas especies de Klebsiella, Enterobacter y Citrobacter. Los coliformes fecales no se encuentran en aguas y suelos que no han estado sujetos a contaminación fecal.⁹
- ✓ Coliformes totales: son bacilos Gram negativos que crecen en presencia de sales biliares y otros compuestos y son capaces de fermentar lactosa con producción de ácido y gas en un rango de temperatura entre 35 y 37 °C en un plazo de 48 horas, pueden ser de origen fecal como no.

⁷ SALTON MJR, Kim KS (1996) Structure. in: Baron's Medical Microbiology (Baron S et al, eds.) (4th ed. edición). Univ of Texas Medical Branch.

⁸ SECRETARÍA DE SALUBRIDAD Y ASISTENCIA. Análisis bacteriológico del agua para el control de su potabilidad. Boletín Informativo 1973;II (10):2-11.

FERNÁNDEZ ESCARTÍN E, COSTARRICA GONZÁLEZ ML, PARRILLA CERRILLO C, ed. Técnicas para el muestreo y análisis microbiológico de alimentos. México, D.F.: Secretaría de Salubridad y Asistencia, 1975.

⁹ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. 1ed. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007. 329p.

- ✓ Color: Es debido a materias disueltas o en estado coloidal. Ese color se designa como verdadero. El color aparente es debido a materias suspendidas; ese color desaparece al sedimentarse las partículas. También puede ser suscitado por iones como hierro y manganeso, por materia orgánica, plancton algas, etc.
- ✓ Conductividad (electrolítica) del agua: mide la capacidad del agua de conducir la electricidad, es medida por la unidad S/m (Siemens/m), $1S = \Omega^{-1}$. La conductividad también puede estar asociada a la cantidad de sólidos disueltos totales.
- ✓ Dureza: se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes (iones cationes, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos o bicarbonatos) y se expresa en equivalentes de carbonatos de calcio constituye un parámetro muy significado en la calidad del agua.¹⁰
- ✓ Efluente: Descarga de una planta de tratamiento o sistema de alcantarillado hacia la red pública o cuerpo receptor.
- ✓ Fuente de agua: lugar de donde se toma el agua para iniciar el tratamiento de potabilización.
- ✓ Flóculo: es una pequeña cantidad de materia formada por la agregación de coagulantes en aguas donde hay partículas coloidales.
- ✓ Metales pesados: La expresión metales pesados se usa para aludir de un modo no muy preciso a ciertos elementos metálicos, y también a algunos de sus compuestos, a los que se atribuyen determinados efectos de contaminación ambiental, toxicidad y eco toxicidad.¹¹ Algunos son esenciales en cantidades bajas en los seres vivos y otros simplemente son dañinos. Ejemplos de estos As, Cd, Co, Hg, Pb, Zn.

¹⁰MARTÍNEZ DE LA ROSA, Gerson Jonathan. Evaluación de dos Agentes Ablandadores de Agua y su Mezcla para Ajustar el Índice de Langelier en Recirculación de Aguas de Enfriamiento y Estabilizar Parámetros Químicos en Calderas de Vapor. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Guatemala, Octubre de 2012. [en línea] Consultado el: 4 de Junio de 2014. Disponible en : http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1277_Q.pdf

¹¹ MARRUEGO José Luis. Evaluación de la contaminación por metales pesados en la Ciénega la soledad y bahía de Cispotá. Universidad de Córdoba. 2011.

- ✓ Nitratos: Son compuestos inorgánicos con fórmula molecular NO_3 , se pueden encontrar tanto en aguas superficiales como subterráneas pero son más comunes en estas últimas debido a fertilizantes y abonos para cultivos. Por lo general no son malos para la salud de los seres humanos pero se tienen unos valores máximos de consumo.
- ✓ Nitritos: Son compuestos inorgánicos formados por un átomo de hidrógeno y dos de oxígeno NO_2 . Los nitritos son mucho más tóxicos que los nitratos pero raramente se encuentran en las aguas subterráneas.
- ✓ Olor y sabor: Los sabores básicos son: salado, dulce, ácido, amargo. Los olores, sólo se pueden descubrir por analogía en otros, por ejemplo: olor a pescado, a tierra, etc. Las aguas para consumo no deben tener ni sabor ni olor alguno.
- ✓ Partículas coloidales: son partículas que tienen tamaños entre los 1 y los 100 nm y son los responsables del color y la turbidez del agua.
- ✓ pH: Es el logaritmo de base 10 del universo de la concentración de iones H. Es un índice de acidez o alcalinidad del agua. Un pH de 7 indica que una sustancia no es ni ácida ni básica. Valores superiores a 7 indican que el agua es alcalina y valores inferiores indican que el agua es ácida. El agua de consumo humano debe ser ligeramente básico.
- ✓ Polímeros de nucleótido: es un compuesto por muchas unidades simples conectadas entre sí.
- ✓ Sólidos en suspensión: son partículas sólidas pequeñas, inmersas en un fluido en flujo turbulento que actúa sobre la partícula con fuerzas en direcciones aleatorias, que contrarrestan la fuerza de la gravedad, impidiendo así que el sólido se deposite en el fondo¹²
- ✓ Turbiedad: la turbidez del agua depende de la cantidad de materia suspendida en ella y se determina por la menor o mayor transparencia de la muestra de agua. La turbidez es causada principalmente por la arcilla.

¹² Sólido de suspensión. Disponible en: http://es.wikipedia.org/wiki/S%C3%B3lido_en_suspensi%C3%B3n. Consultado el: 5 de Julio de 20 14.

Existen un sin número de sustancias que pueden estar presentes en el agua y pueden afectar la salud de los seres humanos , unas más nocivas para la salud que otras, y otras aparentemente inofensivas, entre ellas se tienen: plomo, flúor, selenio, cromo, cobre, hierro, manganeso, magnesio, zinc, cloruros, etc.

2.6. FUENTES DE ABASTECIMIENTO DE AGUA

Al igual que la energía, el agua ni se crea ni se destruye, sólo se transforma, esto quiere decir que la cantidad del agua en el planeta es constante e inagotable, lo que no es constante en su calidad y su disponibilidad a nivel local.

Por facilidad, el ser humano siempre ha mostrado interés por las fuentes hídricas de mayor calidad. Existen unas fuentes hídricas que son llamadas fuentes convencionales (aguas subterráneas y superficiales) y son preferidas a las no convencionales (agua de mar y aguas residuales).

2.6.1. Aguas subterráneas. El agua subterránea es utilizada para el abastecimiento de agua potable. Se forman a partir del agua lluvia que se precipita y se filtra a través del suelo. Como su nombre lo indica, es el agua que se encuentra por debajo de la superficie del suelo donde es alojada en forma de acuíferos.

Frecuentemente, presentan una buena calidad de agua, libre de patógenos, con poca turbidez y sin contaminantes. Es importante resaltar que su disponibilidad es poco afectada por períodos largos de sequía. Presenta una mayor cantidad de iones disueltos como el calcio, potasio, carbonatos, sulfatos entre otros.

2.6.2. Aguas superficiales. Las aguas superficiales son aquellas que se encuentran sobre la superficie terrestre. Ríos, lagos, lagunas, corrientes son ejemplos de ellas. Estas fuentes se alimentan de la precipitación directa, o bien por la descarga de agua de algún marco freático¹³.

El agua superficial es susceptible a la contaminación, presentan actividad biológica, variables niveles de turbiedad, color, olor, sólidos en suspensión, son menos duras y su temperatura varía de acuerdo a la época del año.

Por lo general es más fácil tratar las aguas subterráneas ya que están libres de contaminantes. En la tabla 2 se muestra un estudio comparativo entre las aguas superficiales y subterráneas.

Tabla 2. Cuadro comparativo entre aguas superficiales y subterráneas

Características Examinadas	Aguas superficiales	Aguas Subterráneas
Temperatura	Varía según la época del año	Constante
Turbiedad	Variable, a veces elevada	Baja o Nula
Mineralización	Variable en función de los terrenos, precipitación, vertidos, etc.	Sensiblemente constante, generalmente mayor que en la superficie de la misma región
Dióxido de carbono	Generalmente ausente	Normalmente presente en gran cantidad
Nitratos	Poco abundante en general	Contenido a veces elevado de metahemoglobinemia
Oxígeno disuelto	Normalmente próximo a la saturación	Ausencia total en la mayoría de los casos
Microorganismos	Bacterias(algunas patógenas), virus, plancton	Frecuentemente ferro bacterias

Fuente: DEGREMONT, G. Manual técnico del agua. 4 ed. España. 1979. 1142p.

¹³ COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. 1ed. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007. 329p.

3. SELECCIÓN Y CRITERIOS DE DISEÑO DE LA PLANTA

Este capítulo tiene por objeto estudiar la normatividad colombiana con respecto al tratamiento de agua. Al comienzo de él se mencionan los análisis necesarios que permiten describir la calidad de un determinado tipo de agua. Con esto se puede concluir si una fuente es o no apta para consumo humano. Además, este capítulo incluye los análisis microbiológicos, físicos y químicos del agua que fue seleccionada y sometida para realizar las pruebas de la planta. Al final de este capítulo se hace un esquema organizacional de los procesos y la estructura que este proyecto desarrollará.

3.1 NORMATIVIDAD COLOMBIANA

Antes del diseño de cualquier planta de tratamiento de agua se tiene que tener en cuenta la normativa que regula la dotación de agua potable. En Colombia existe una resolución que regula la calidad del consumo de agua potable, esta es la Resolución 2115 del 22 de junio 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” creada por el ministerio de la protección social, y el ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo social.

De acuerdo con esa resolución se definen los siguientes conceptos, sacados textualmente de allí:

- ✓ **ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO DEL AGUA:** Son los procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para consumo humano para evaluar la presencia o ausencia, tipo y cantidad de microorganismos.
- ✓ **ANÁLISIS BÁSICOS:** Es el procedimiento que se efectúa para determinar turbiedad, color aparente, pH, cloro libre o residual de desinfectante usado, coliformes totales y *Escherichia coli*.
- ✓ **ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS:** Es el procedimiento que se efectúa para las determinaciones físicas, químicas y microbiológicas no contempladas en el análisis básico, que se enuncia previamente y todas aquellas que se indiquen en el mapa de alto riesgo.
- ✓ **ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO DEL AGUA:** Son aquellos procedimientos de laboratorio que se efectúan a una muestra de agua para evaluar sus características físicas, químicas o ambas.
- ✓ **CARACTERÍSTICA:** Término usado para identificar elementos, compuestos, sustancias y microorganismos presentes en el agua para consumo humano.

3.2 PRUEBAS

El proyecto tomará como fuente hídrica una fuente de agua superficial en una finca ubicada a las afueras de la ciudad de Bucaramanga en la vía Cúcuta.

FUENTE SUPERFICIAL

La fuente de la que se tomó la muestra fue un pequeño lago artificial que se encuentra en la finca. En la figura 2 se muestra dicho recurso hídrico. Se puede

ver que el agua no presenta las mejores condiciones y se ve turbia, sucia y de muy mala calidad.

Figura 2. Fuente de agua superficial



Las muestras que se tomaron se presentan en el siguiente registro fotográfico. Véase figura 3.

Figura 3. Muestras de agua



Como se puede observar en la figura se muestran dos recipientes, el de tapa blanca se utilizó para el análisis microbiológico del agua, este recipiente necesariamente tenía que estar desinfectado antes de tomar la muestra para que no existieran microorganismos presentes con anterioridad y que pudieran arrojar falsos positivos. El recipiente de tapa azul se usó para el análisis físico y químico de la muestra, con este último no hubo tantas precauciones como con el primero, aunque también se desinfectó y pringó.

Se realizó un análisis básico de aguas donde se evaluaron diferentes parámetros. El análisis de la calidad microbiológica incluyó los siguientes parámetros:

- ✓ Bacterias mesofílicas
- ✓ Coliformes totales
- ✓ Coliformes fecales

En el análisis físico y químico los parámetros evaluados fueron

- ✓ pH
- ✓ Color
- ✓ Turbiedad
- ✓ Conductividad
- ✓ Cloro residual
- ✓ Alcalinidad parcial
- ✓ Alcalinidad total
- ✓ Dureza total

Se hizo un análisis básico y no uno complementario por dos razones:

1. La región del área metropolitana no representa una zona de alto riesgo por agua contaminada, ya que estas regiones están asociadas a lugares donde

existen altos focos de contaminación por ejemplo un lugar cercano a una mina donde puede haber contaminación por metales pesados.

2. Hacer un estudio complementario implicaría un incremento considerable en los costos del proyecto.

Los análisis se realizaron en el Laboratorio Bacteriológico de Alimentos LABALIME, certificado con ISO 9001. Estos fueron los resultados:

ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

La técnica utilizada para determinar el número y tipo de microorganismos es la filtración por membrana. El método consiste en pasar una muestra de agua por medio de una membrana con un determinado tamaño de poros ($0,45 \mu m$), la consiguiente retención de los microorganismos sobre dicha membrana y el cultivo de los mismos en diferentes agares de acuerdo al tipo de microorganismo.¹⁴ En la tabla 3 se muestra el análisis microbiológico de la muestra.

Tabla 3. Análisis microbiológico de la muestra 1

PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR	UNIDAD	TÉCNICA
Bacterias mesofílicas	600	0	100	ufc/100 ml	Filtración por membrana
Coliformes totales	300	0	0	ufc /100 ml	Filtración por membrana
Coliformes fecales	100	0	0	ufc /100 ml	Filtración por membrana

¹⁴ Método de la membrana filtrante para el análisis microbiológico del agua. Disponible en http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_farmacia/catedraMicro/10_membrana_filtrante.pdf. Tomado el: 18 de Noviembre de 2014

Donde las UFC son las unidades formadoras de colonias las cuales son unas unidades que indican el grado de contaminación microbiológica de una determinada muestra. Para el análisis microbiológico se miden con respecto a una muestra de 100 ml del agua.

ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO

Para los análisis físicos y químicos se utilizan las técnicas mostradas en la tabla 4 para cada parámetro.

Tabla 4. Análisis físico y químico muestra 2

PARÁMETRO	RESULTADO	*LÍMITE PERMISIBLE	UNIDAD	TÉCNICA
pH	6,49	6,5-9	---	St.Mth. 4500 H+B
Color	483	Máx. 15	UPC	HACH 120
Turbiedad	35,7	2	NTU	St.Mth. 2130 b
Conductividad	90,5	50-1000	us/cm	St. Mth. 2510 b
Cloro residual	---	0,3-2	mg/l Cl_2	St. Mth. 4500 Cl G
Alcalinidad P	0	---	mg/l $CaCO_3$	St.Mth. 2320 B
Alcalinidad total	9	Máx 200	mg/l $CaCO_3$	St.Mth. 2320 B
Dureza total	27	300	mg/l $CaCO_3$	St.Mth. 2320 C

*Límites permitidos según Resolución 2115 del 22 de junio/07 para Agua Potable

--- No detectado

Fuente: Autor

Donde el pH no presenta unidades, el color se mide en unidades de platino cobalto UPC. La turbiedad se mide en unidades nefelométricas de turbidez NTU, la alcalinidad en micro Siemens por centímetro, el cloro en miligramos/ litros de

cloro Cl_2 y la dureza y alcalinidad en miligramos sobre litro de carbonato de calcio $CaCO_3$.

De los resultados se pueden sacar varias conclusiones

- ✓ El agua presenta una mala calidad microbiológica, ninguno de los parámetros microbiológicos cumplió con los límites establecidos por la norma colombiana.
- ✓ Entre los parámetros físicos y químicos el pH se encuentra casi entre el rango, como era de esperar el color y la turbiedad tienen valores muy superiores a los establecidos por la norma.
- ✓ La conductividad, Alcalinidad y dureza se encuentran dentro de los valores adecuados.

3.3 PARÁMETROS DE DISEÑO

El proyecto estableció una capacidad mínima de proceso, se determinó que el sistema deber ser portátil, es decir, debe estar construido de un material liviano y debe tener las menores dimensiones posibles, además que debe ser de fácil manejo. El sistema tiene que recurrir a una fuente de energía de fácil acceso (energía eléctrica) y está diseñado para unos tipos específicos de agua. De acuerdo a esto se establecen los siguientes parámetros de diseño.

- ✓ Capacidad de proceso: 500 l/h. Con esto se garantiza el abastecimiento de agua de al menos 8 familias. Al abastecer un número grande de personas se reduce el costo per cápita de la máquina.
- ✓ Tipo de operación: manual. Facilita y simplifica el uso de la planta.
- ✓ Voltaje de trabajo: 110 V-60 Hz. Es el voltaje de uso doméstico o residencial. De muy fácil acceso, económico y de elevada eficiencia.

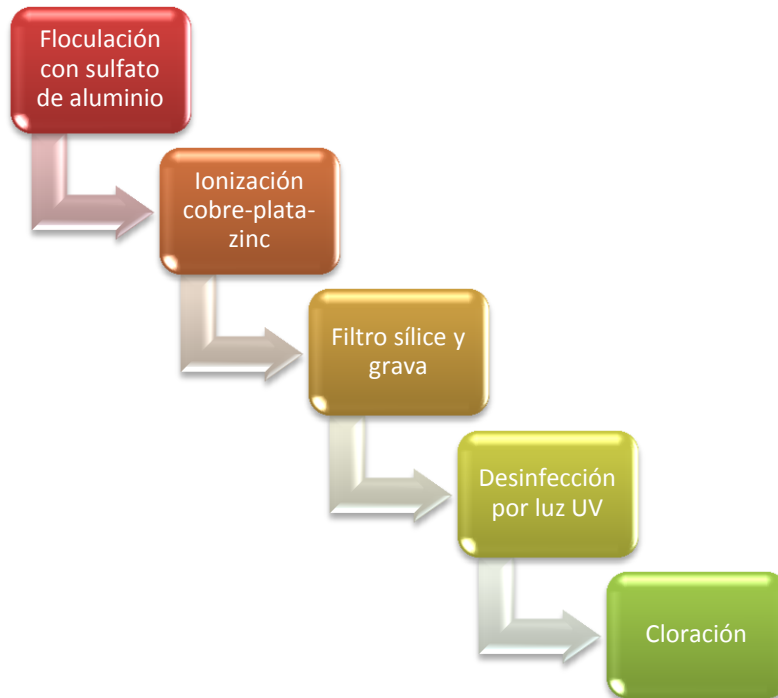
- ✓ Máximo de turbiedad: 40 UTN. El modelo se diseñó y probó con fuentes hídricas que presenten turbiedades no superiores a los 40 UTN.
- ✓ Medidas 1mX1mX1m: Con estas medidas se garantiza su fácil desplazamiento a zonas rurales.

3.4 SUBSISTEMAS

Como se puede observar en los análisis, ciertas características del agua no cumplen con la normatividad exigida por los organismos del estado. Para que el agua sea potable, se tienen que mejorar algunas de los parámetros que excedieron los límites permisibles, principalmente el color, la turbiedad y lo relacionado con la parte microbiológica del agua (bacterias mesofílicas, coliformes totales y coliformes fecales).

Para ello se requiere diseñar un proceso que mejore la calidad física, química y microbiológica del agua que se va a tratar. El proceso que se diseñó inicia con la extracción del agua cruda por medio de una bomba centrífuga, el líquido se dirige en primer lugar hacia el dosificador de coagulante el cual adiciona sulfato de aluminio por medio de un diferencial de presión. El proceso sigue con la ionización de cobre, plata y zinc la cual reduce el número de contaminantes del agua por medio de reacciones oxido reducción.

Figura 4. Proceso de tratamiento de agua en la planta potabilizadora



A continuación el agua pasa a través del filtro de grava y sílice el cual tiene como función clarificar el agua y eliminar partículas en suspensión. El proceso continúa con la desinfección por luz UV la cual elimina virus, bacterias y protozoos a 253,4 *nm* y finaliza con la adición de cloro (hipoclorito de calcio al 91%) para eliminar aquellos microorganismos que no pudieron ser retirados por los procesos descritos anteriormente y así garantizar una alta calidad en el agua que se va a suministrar. En la figura 4 se muestra un diagrama del proceso.

Para facilitar el diseño y la selección de los elementos que se van a utilizar para la fabricación del sistema portátil, éste se dividió en varios subsistemas y se dividieron por capítulos de la siguiente forma.

✓ Estructura de soporte: capítulo 4

- ✓ Dosificador por diferencial de presión de floculante: capítulo 5
- ✓ Ionizador electrolítico de cobre , plata y zinc: capítulo 6
- ✓ Filtro de sílice y grava: capítulo 7
- ✓ Sistema hidráulico: capítulo 8
- ✓ Lámpara de desinfección ultravioleta: capítulo 9
- ✓ Dosificador de cloro por diferencial de presión: capítulo 9
- ✓ Caja de control: capítulo 10

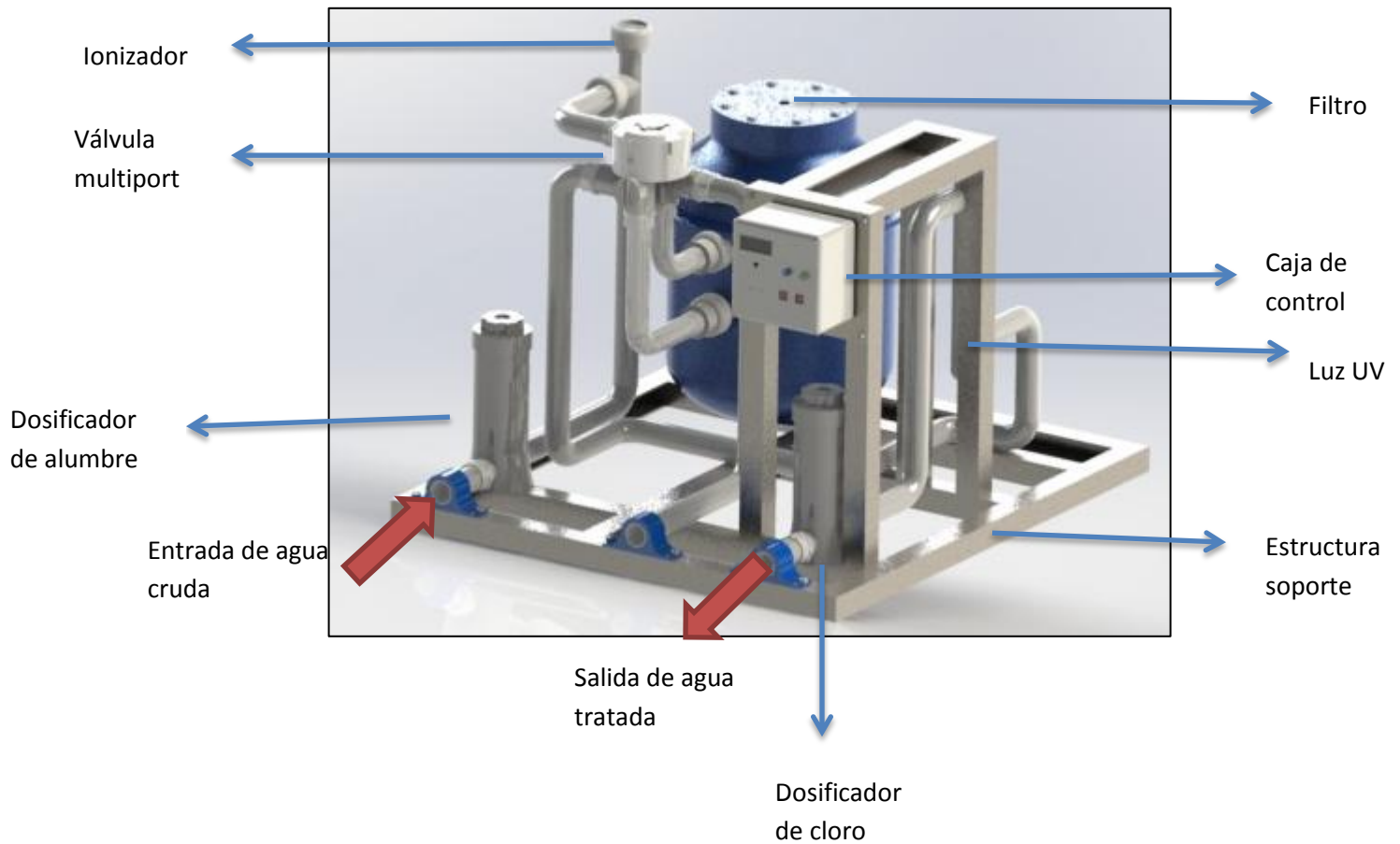
En la figura 5 se muestra la división de los subsistemas para la planta portátil de tratamiento de agua.

Figura 5. Subsistemas de la planta portátil de tratamiento de agua



En la figura 6 se muestra el diseño de la planta portátil de tratamiento de agua realizado en el software SolidWorks 2012.

Figura 6. Render planta portátil de tratamiento de agua



4. MATERIALES COMPUESTOS

La historia de la humanidad siempre ha estado relacionada con el de descubrimiento de nuevos materiales. Contrario a lo que se piensa, los materiales compuestos siempre han estado presentes en el desarrollo de las distintas civilizaciones. Un ejemplo de un material compuesto en la naturaleza es la madera, la cual combina fibras de celulosa de estructura celular con una matriz de lignina.¹⁵

En la actualidad existen muchas tecnologías que requieren materiales con una gran cantidad de características que no se pueden obtener por si solas con los tipos de materiales convencionales (cerámicos, polímeros y metales), es por ello que se hace necesario el uso de los materiales compuestos para ciertas aplicaciones. Este proyecto de grado utilizará como material estructural el poliéster reforzado con fibra de vidrio el cual es un material compuesto y por ello es importante definir y explicar qué son como se mostrará durante el desarrollo de este capítulo.

4.1 DEFINICIÓN

En términos generales se considera que los materiales compuestos son aquellos materiales que se mezclan para conseguir mejores propiedades. Estos materiales se pueden elaborar y utilizar para obtener combinaciones poco frecuentes como

¹⁵ BESENDNJAK Alejandro. Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones.1 ed. Barcelona: Ediciones UPC, 2005.123p.

resistencia, rigidez, peso, resistencia a la corrosión, elevado desempeño a elevadas temperaturas, entre otras.

En todo material compuesto se distinguen dos compuestos:¹⁶

1. La matriz, componente que se presenta en fase continua, sirve de sustancia de aglutinamiento
2. El refuerzo, en fase discontinua que es el elemento resistente

4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

Los materiales compuestos se pueden clasificar de la siguiente forma:

- ✓ **Materiales compuestos reforzados con partículas**, como el hormigón el cual es una mezcla de cemento (matriz) y grava (partículas), estos materiales se elaboran con el fin de que las partículas soporten parte de la carga que es cargada sobre la matriz.
- ✓ **Materiales compuestos reforzados por fibras**, consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia- peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada.¹⁷

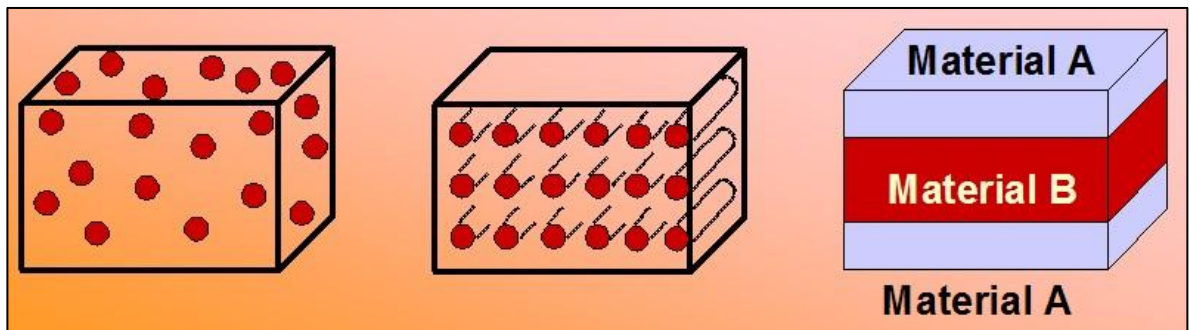
¹⁶ POVEDA Santiago. LECTURAS COMPLEMENTARIAS: Materiales compuestos.1 ed. Madrid: Ediciones UPM, 2008.23p.

¹⁷ ASKELAND, Donald R. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3 ed. México: International Thomson Editores, 1998. 854p.

- ✓ **Materiales compuestos estructurales**, Un material compuesto estructural está formado tanto por materiales compuestos como por materiales homogéneos y sus propiedades no sólo dependen de los materiales constituyentes sino de la geometría del diseño de los elementos estructurales¹⁸.

En la figura 7 se muestra la clasificación de los materiales compuestos como se explicó en esta sección.

Figura 7. Clasificación de los materiales compuestos



Fuente: Materiales. Disponible en:
http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/Imagenes/Fig15_24.jpg

4.3 POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO

Este proyecto de grado tiene como principal material de construcción el poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV) ya que la estructura de soporte y el filtro de grava y sílice van a ser fabricados en su totalidad de este material. El PRFV es un

¹⁸ MORAL Alberto. Materiales de última generación y materiales eficientes. materiales compuestos – composites. Junio 2007

material que presenta ventajas que justifican su uso con respecto a otros materiales :

- ✓ Es ligero, presentan densidades mucho menores que la de los aceros por tanto son más livianos y fáciles de cargar.
- ✓ Es firme y sólido.
- ✓ Es más resistente que el acero, aluminio, PVC y madera.
- ✓ Tiene la misma expansión térmica que el acero.
- ✓ Ofrece un gran aislamiento térmico y eléctrico lo cual disminuye riesgos de accidentes al operador de la planta.

El PRFV es un material compuesto formado básicamente por dos elementos:

1. Una matriz resinosa que puede estar elaborada de epoxi, resina de poliéster, acrílica etc. Para el caso particular de este proyecto se seleccionó resina de poliéster como matriz.
2. Un refuerzo, que puede ser fibras o tejidos en fibra de vidrio, boro o carbono.

4.3.1. Resina De Poliéster¹⁹. La resina de poliéster $C_{10}H_8O_4$ es una sustancia líquida que puede pasar al estado sólido mediante una reacción química provocada por agentes externos que le aportan flexibilidad y dureza; por sí sola presentan una gran resistencia a la compresión y a levadas temperaturas, pero son rígidas y con poca resistencia a la tensión. Es la matriz del material compuesto y se encarga de soportar las fibras y mantenerlas en su lugar correcto; además transfiere las cargas a las fibras fuertes, las protege de sufrir daños durante su manufactura y su uso y evitan la propagación de grietas en la fibra a todo lo largo del compuesto. La matriz, por lo general, es responsable del control principal de las propiedades eléctricas, el comportamiento químico y el uso a elevadas temperaturas del compuesto.

Las matrices poliméricas son particularmente comunes. La mayoría de los polímeros, tanto termoplásticos como termoestables, están disponibles en grados correspondientes a reforzamiento con fibras de vidrio cortas. Los procesos de moldeo de láminas de compuesto (SMC) y de moldeo en volumen (BMC) son típicos de esta clase de compuestos.

4.3.2. Fibra de vidrio. Del vidrio es posible sacar fibras que puede tejerse como fibras textiles, estirando el vidrio fundido hasta alcanzar fibras de diámetros inferiores a una centésima de milímetro. La fibra de vidrio mezclada con plástico logra unir las propiedades de los dos elementos (la solidez y la estabilidad química del vidrio con la capacidad de absorber golpes del plástico), adicionalmente es muy buen aislante eléctrico.²⁰

¹⁹ ASKELAND, Donald R. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3 ed. México: International Thomson editores, 1998. 854p.

²⁰ MCLAREN. Donald. Novedades científicas alemanas. Plástico reforzado con fibra de vidrio. Vol. XXVII.600. Noviembre de 1995.

La mayoría de los compuestos reforzados con fibra consiguen una mejor resistencia a la fatiga, mejor rigidez y una mejor relación resistencia-peso, al incorporar fibras resistentes y rígidas aunque frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite la fuerza a las fibras, las cuales soportan la mayor parte de la fuerza aplicada. La resistencia del compuesto puede resultar alta a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.²¹

Las ventajas más notables de los artículos fabricados con fibra de vidrio son: la ligereza, resistencia, innovación, practicidad y durabilidad.

4.4 PROCESO DE FABRICACIÓN PIEZA DE PRFV

El proceso de fabricación de una pieza PRFV está basado en el modelado, es decir, de piezas ya elaboradas se sacan nuevas. Por lo general este primer molde que sirve para hacer otros más está elaborado de madera y cubierto por yeso, fibra de vidrio y resinas. Es común ver que estos moldes estén formados por varias piezas lo cual evita que al momento de desmoldar la nueva pieza ésta se pegue al molde original.

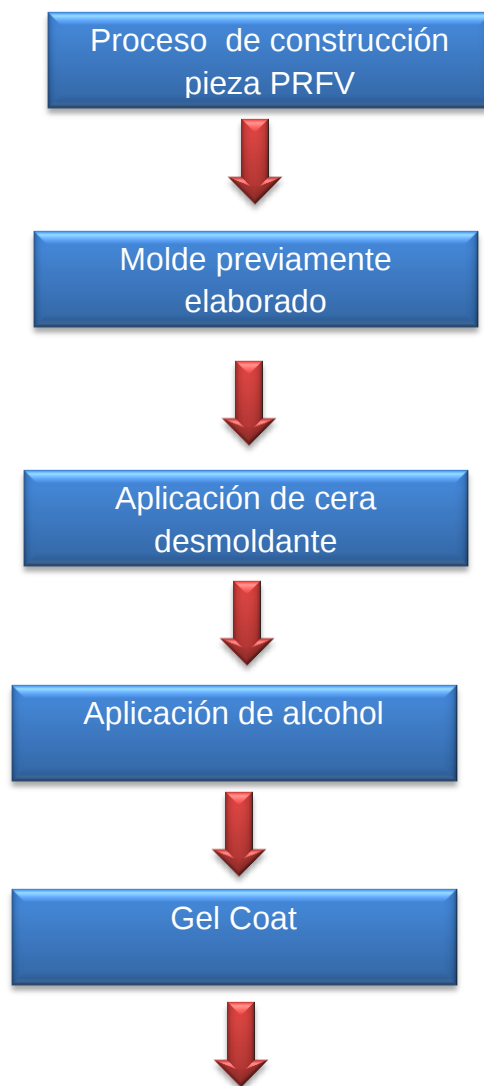
Con la pieza original ya lista se comienza aplicando la cera de desmolde de manera generosa sobre la pieza modelo, su labor es importante ya que evita que la pieza se pegue a la original. El tiempo del proceso dependerá del tamaño de la pieza a fabricar, por ejemplo para un filtro del tamaño de este proyecto el proceso no demora más de 5 minutos.

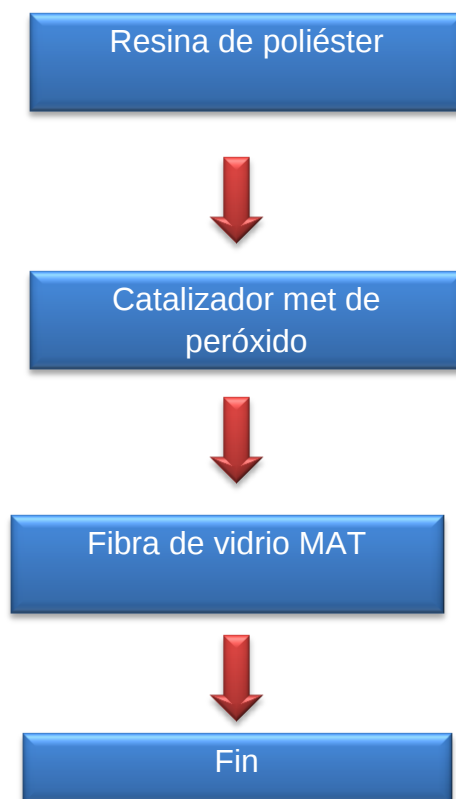
²¹ ASKELAND, Donald R. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3 ed. México: International Thomson Editores, 1998. 854p.

Una vez esparcida la cera se continúa añadiendo una película separadora por medio de una esponja cubriendo la totalidad del molde, esta ayuda a que la pieza no se pegue. Se espera a que se seque para continuar aplicando el Yelco (el cual es una mezcla de varios compuestos) entre ellos: resina de poliéster, peróxido de Metil-Etil-Cetona (catalizador), cobalto (acelerador) y un pigmento que será el encargado de darle el color a la pieza. Este proceso debe hacerse rápidamente y con mucha precaución pues la nueva pieza se puede endurecer de forma rápida y desapareja.

Ya con el Yelco seco y catalizado, se procede a utilizar la fibra de vidrio de tipo MAT y se acomoda de acuerdo a las características morfológicas del molde. Se repite este proceso con más resinas dependiendo del espesor de pieza que se requiera. Para finalizar se procede al desmolde de la pieza. En la figura 8 se muestra un esquema del proceso de fabricación de una pieza en PRFV.

Figura 8. Fabricación de una pieza en PRFV





4.5 PROPIEDADES DEL POLIÉSTER REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO

En la tabla 5 se muestran las propiedades mecánicas del poliéster reforzado con poliéster de vidrio dados por las Normas ASTM.

Tabla 5. Propiedades mecánicas del PRFV

PROPIEDADES	MÉTRICO	COMENTARIO	NORMA
Densidad	1,72-1,94 g/cc		ASTM D792
Esfuerzo a la tensión, último	48,3 MPa	Longitudinalmente	ASTM D638
	207 MPa	Transversalmente	ASTM D638
Módulo de Young	5,52 GPa	Longitudinalmente	ASTM D638

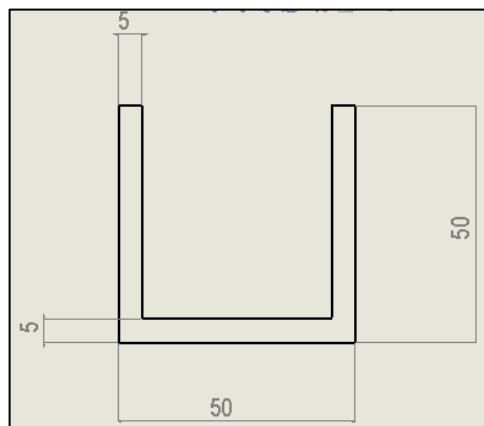
PROPIEDADES	MÉTRICO	COMENTARIO	NORMA
	17,2 GPa	Transversalmente	ASTM D638
Coeficiente de Poisson	0,32	Longitudinalmente	ASTM D638
Módulo de compresión	6,89 GPa	Longitudinalmente	ASTM D635
	17,2 GPa	Transversalmente	ASTM D638
Dureza Barcol	45		ASTM D2583

Fuente: MatWeb, Your Source for Materials Information. Disponible en: www.matweb.com

4.6 PERFIL

El perfil seleccionado para hacer la estructura es el que se muestra en la figura 9, un perfil en forma de U de 50 *mm* X 50 *mm* y con un espesor de 5 *mm*.

Figura 9. Perfil estructura de la planta



En el anexo E se muestra una tabla detallada con las características del perfil seleccionado.

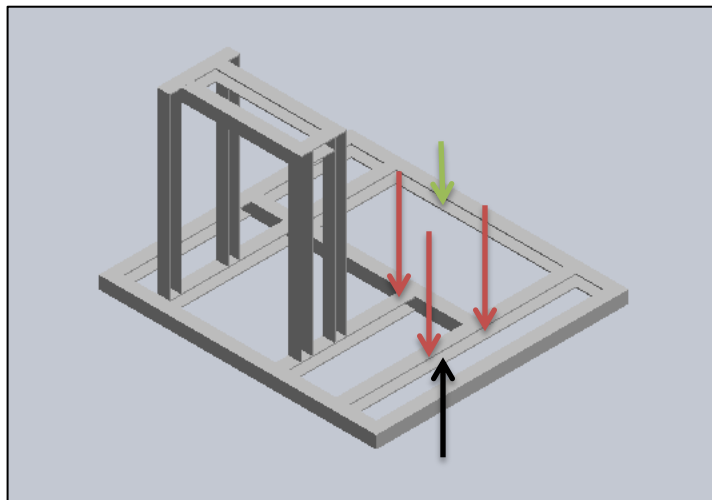
4.7 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

A continuación se muestra el diseño preliminar de la estructura, para la cual se tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Ubicación de los elementos que forman en el sistema: el filtro, la lámpara UV, los dosificadores de cloro y sulfato de aluminio.
- ✓ El tamaño de la instalación.
- ✓ Se hizo lo más sencillo posible
- ✓ Que además de ser resistente a las cargas sea ligero
- ✓ Que sea capaz de soportar las condiciones ambientales del lugar: sol, lluvia y que sea resistente a la corrosión.

El diseño de la estructura se hizo en el programa SolidWorks 2012 y se muestra en la figura 10. Es una estructura que tiene las siguientes dimensiones: 1,105X1,005 X 0,71m.

Figura 10. Diseño de la estructura en SolidWorks 2012



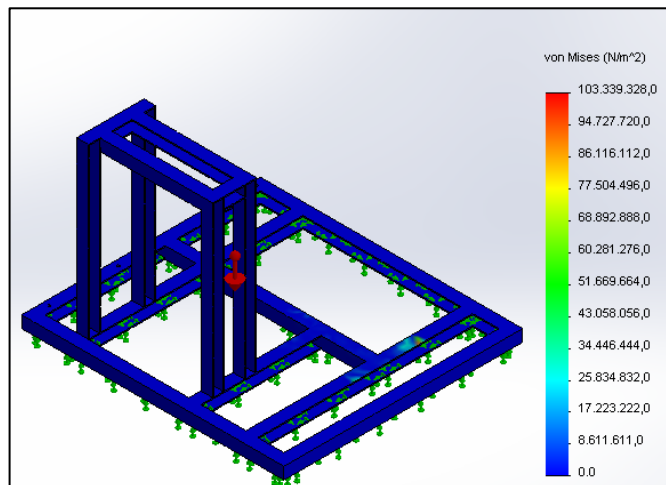
Además del diseño, se hizo un análisis estático de la estructura, donde se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

- ✓ La gravedad(línea verde en el diagrama)
- ✓ La masa del filtro (aproximadamente 70 kg con la masa de la arena y la grava), la cual se representa por las tres líneas rojas que es donde se encuentra soportado el filtro.
- ✓ En esta simulación no se tuvo en cuenta la masa de los otros elementos (tuberías, accesorios, bomba centrífuga etc.).

El análisis que se tomó para calcular las tensiones es el de Von Mises en el anexo D se encuentra la teoría de las tensiones Von Mises

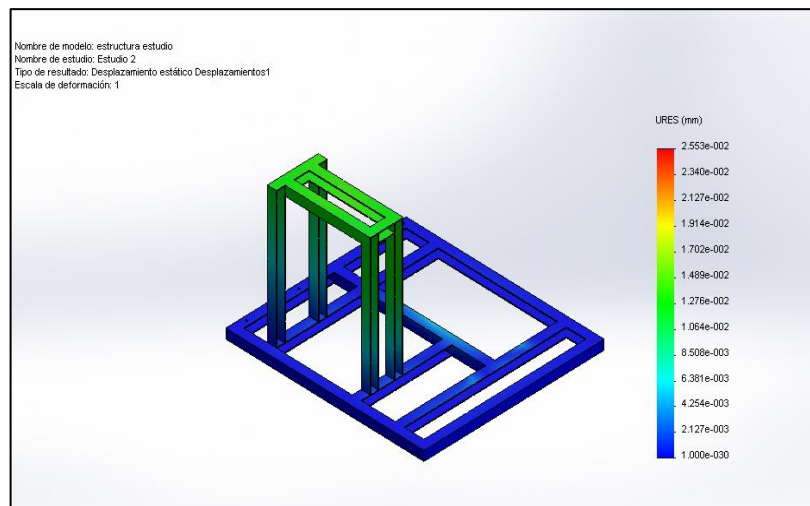
Se tomó como sujeción fija la parte inferior de la estructura que está en contacto con el suelo (líneas verdes en la figura 11)

Figura 11. Análisis de tensiones vonMises



De la figura se deduce que los mayores esfuerzos ocurren en el lugar donde se encuentra apoyado el filtro. Además de este estudio se hizo otro de deformaciones donde se encontró que la máxima deformación fue de 0,0049 mm, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Campo de deformaciones de la estructura



Con el prototipo diseñado en SolidWorks 2012 y los planos elaborados se procedió a fabricarlo como lo muestra la figura 13.

Figura 13. Construcción de la estructura



El proceso de fabricación de la estructura es el que se describe en la sección 4.4 .

5. PROCESO DE COAGULACIÓN

La coagulación es un proceso básico pero fundamental para el tratamiento de agua. La turbiedad y el color son originados por las partículas coloidales que presentan un diminuto tamaño. Estas partículas pueden ser difíciles de sedimentar por su poco peso y pueden atravesar lechos filtrantes muy finos por su pequeño diámetro. Para eliminar estas partículas se utiliza el proceso de la coagulación que en sencillas palabras busca juntar estas partículas para formar cúmulos de mayor tamaño y así eliminarlas de una forma más fácil mediante procesos de filtración.

Este capítulo abarca todo el proceso de la coagulación. Comienza haciendo unas definiciones básicas sobre el proceso, más adelante incluye la química de la coagulación y finaliza con la explicación del dosificador y las dosis seleccionadas para la fuente que se seleccionó.

5.1 DEFINICIÓN

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se produce al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de los coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.²²

²² ANDÍA Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y Floculación. 1ed. Lima. 2010. 44p.

La coagulación busca causar la coalescencia o agregación de material suspendido no sedimentable y partículas coloidales del agua y aguas residuales.²³ Por medio de este proceso se puede eliminar turbiedad, color, microorganismos y sustancias que causan color y olor.

Las aguas no tratadas presentan tres clases de sólidos no sedimentables (ver tabla 6) conocidos como sólidos suspendidos, coloidales y disueltos.

Tabla 6. Tiempo de sedimentación para algunas partículas

TABLA DE SEDIMENTACIÓN PARA ALGUNAS PARTÍCULAS		
Diámetro partícula, mm	Partícula representativa	Tiempo requerido para una profundidad de asentamiento de 0,5 m
Sedimentables		
10	Grava	0,3 s
1	Arena gruesa	3 s
0,1	Arena fina	38 s
0,01	Limo	33 min
No sedimentables		
0,001	Bacterias	55 horas
0,0001	Color	230 días
0,00001	Coloides	6,3 años
0,000001	Coloides	63 años

Fuente: AWWA, Water Quality and Treatment, 3ed., McGraw-Hill Book Cp.,1951

²³ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIQUIMICA. 1 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996. 226p.

5.2 COAGULANTE

Los coagulantes son aquellos compuestos de hierro o aluminio capaces de formar un flóculos y que pueden generar coagulación al ser añadidos al agua.²⁴

En la actualidad se emplean diferentes tipos de coagulantes como los derivados del aluminio, la cal y del hierro. El coagulante que más se ha utilizado es el sulfato de aluminio conocido popularmente como alumbre y de fórmula química $Al_2 SO_4 \cdot 3 \cdot 14H_2O$. Otros tipos de compuestos que también se utilizan como coagulantes son el sulfato férrico, el cloruro férrico y de aluminio, sulfato ferroso y de cal, aluminato de sodio y de cal.

5.3 COLOIDE

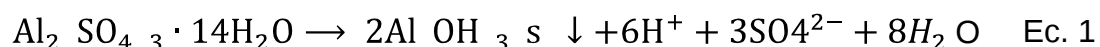
Son partículas que tienen un tamaño que varía entre los 1 y los 100 *nm* en diámetro, se caracterizan por ser sólidos que no sedimentan por la acción de la gravedad, pero que sí lo hacen por métodos químicos o físicos como la filtración y coagulación. Se clasifican de acuerdo a su afinidad con el agua. Es así que se encuentran los hidrófilos los cuales reaccionan químicamente con el agua y los coagulantes. Por otro lado existen los hidrofóbicos, los cuales no reaccionan con el agua y su coagulación vendrá dada por reacciones físicas más no químicas.

²⁴ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIQUIMICA. 1 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996. 226p.

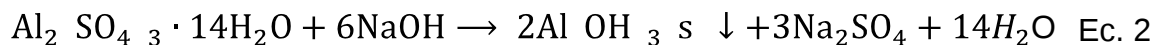
5.4 QUÍMICA DE LA COAGULACIÓN

Dependiendo el tipo de coagulante que se vaya a utilizar se tendrá la reacción química. Para este proyecto se utilizará sulfato de aluminio. De estos existen dos tipos tipo A y tipo B. Para las pruebas de este proyecto se utilizó el segundo pues demuestra ser más eficiente en aguas con altos valores de turbidez y color. Otro factor que determinó la utilización del sulfato de aluminio es su fácil acceso y su bajo costo, una bolsa con 500 g cuesta alrededor de 1000 pesos.

Las reacciones químicas que ocurren cuando se añade sulfato de aluminio se expresa mediante la ecuación 1



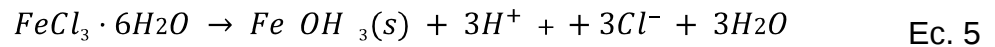
Después que el $\text{Al}(\text{OH})_3$ se precipita ocurre una acidificación, ésta puede bajar mucho el pH y consumir la alcalinidad. El cambio del pH dependerá de la alcalinidad inicial. Si la alcalinidad que se tiene no es suficiente para neutralizar la caída en el pH se le debe agregar algún compuesto para que el pH se mantenga dentro de los rangos establecidos. Para estos casos es usual utilizar hidróxido de sodio (NaOH), hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ o carbonato de sodio. La reacción para el alumbre y el hidróxido de sodio (soda caustica) es:



Para el hidróxido de calcio sería:



Si se añade otro tipo de coagulante como el sulfato férrico y el cloruro férrico las ecuaciones serían, respectivamente:



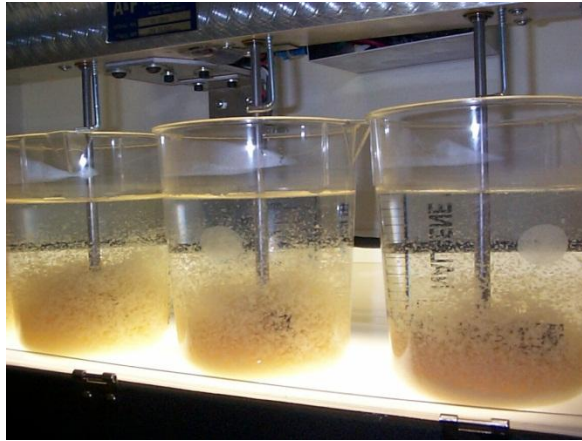
Para el agua seleccionada se necesitó utilizar el hidróxido de sodio para aumentar el pH puesto que el agua con la que se trabajó tenía un pH casi neutro pero con tintes ácidos (alrededor de 6,5) al agregarle el sulfato de aluminio se consiguió mejorar la turbidez y el color pero se acidificó el agua, por tanto fue necesario la utilización de este compuesto NaOH.

5.5 ENSAYO DE PRUEBA DE JARRAS

Es un método de simulación de los procesos de Coagulación y floculación, Realizado en laboratorio que permite obtener agua de buena calidad, fácilmente separable por decantación; los flóculos formados con diferentes dosis del coagulante dan como resultado valores de turbiedad diferentes. Su objetivo es determinar las variables físicas y químicas de los procesos de coagulación; floculación y sedimentación; tales como: selección del coagulante; selección del pH óptimo; gradientes y tiempos de mezcla rápida y floculación y correlación de las velocidades de sedimentación y la eficiencia de remoción.²⁵

²⁵ ANDÍA Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y Floculación

Figura 14. Ensayo de jarras



Fuente: Re-chemical. En sistemas de cloración. Disponible en: www.r-chemical.com

5.6 DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE

Se debe seleccionar primero el coagulante que se va a utilizar, para esta aplicación se utilizará sulfato de aluminio por su fácil acceso en la región y por su bajo costo. Es un sólido cristalino grisáceo que contiene aproximadamente 17% en masa de alúmina $Al_2 SO_4_3$, soluble en agua. Por lo general, se logran los mejores resultados en la coagulación con dosificaciones de alumbre que varían desde los 1 hasta los 150 mg/l (Howe y Hand). No existe un manual que dé indicaciones de cuánto contenido de sulfato de aluminio se es necesario agregar, esto simplemente se hace con prueba y error hasta que se obtengan los resultados esperados. La dosificación de coagulante depende del tipo de agua a tratar y con esto se incluyen características como la turbiedad, color, sólidos suspendidos, materia orgánica e inorgánica presente, entre otros.

El manual mexicano para plantas potabilizadoras recomienda el siguiente proceso para encontrar la dosis óptima de coagulante necesaria.

1. Se comienza añadiendo al agua el coagulante en intervalos grandes comenzando con dosis pequeñas de coagulantes y se van aumentando .Por ejemplo comenzar con 2,5, 10, 20,40.... 80 mg/L, e ir observando la calidad de agua a la salida.
2. Una vez se detecte un valor “bueno” de coagulante, se empieza a dosificar en ese rango a intervalos más pequeños. Por ejemplo, se obtuvieron valores aceptables de agua a 30 mg/L, entonces se comienza añadiendo 23, 25, 27, 29, 30, 31, 33 mg/L y así hasta que se obtenga el valor óptimo.

Este proceso se hizo para la fuente hídrica que se tomó y se encontró por experimentación que el valor óptimo de dosificación fue de 10 mg/l.

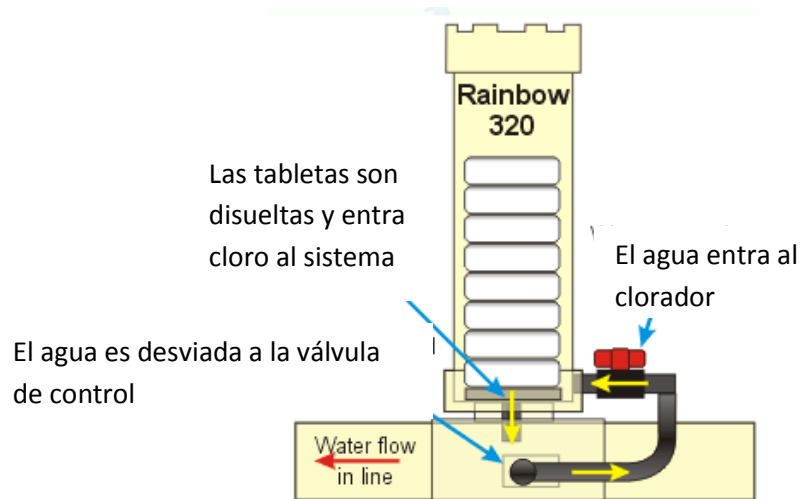
5.7 DOSIFICADOR

El dosificador seleccionado tiene las siguientes características:

- ✓ Fácil acople a tuberías de 1 ½ “
- ✓ Válvula de control que permite ajustar la dosis de floculante
- ✓ Diseño de rosca para fácil acceso de las tabletas
- ✓ Capacidad: 1.5 kg de producto

El dosificador seleccionado es de tipo erosivo, su funcionamiento se ilustra en la figura 15. Como se ve, el dosificador tiene una línea la cual toma una parte del fluido y la dirige hacia él, donde dependiendo de la dosis calibrada entra cierta cantidad de agua la cual entra en contacto con el producto y lo comienza a erosionar.

Figura 15. Funcionamiento dosificador de sulfato de aluminio



Fuente: Chlorine Feeders. Disponible en: http://www.poolplaza.com/pool-school/chlorine_feeders.shtml , modificado por el autor

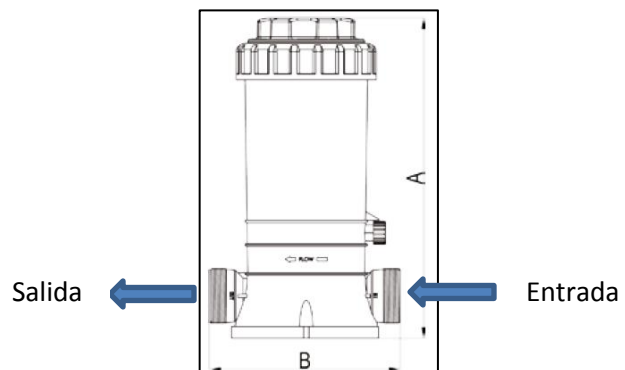
En la tabla 7 se muestran las medidas del dosificador de alumbre

Tabla 7. Dosificador de cloro y/o alumbre

MEDIDA	VALOR[m]
A	0,3
B	0,2
D	0,14

En la figura 16 se muestra el esquema del dosificador de sulfato de aluminio, el fluido entra a través de la tubería y se le es inyectada una determinada cantidad de fluido de acuerdo a la dosis regulada por la válvula de dosificación.

Figura 16. Dosificador de sulfato de aluminio



Fuente: Manual de fabricante.

6. PROCESO DE IONIZACIÓN

Este capítulo centra la atención en el proceso de ionización, el cual después de la coagulación, es el segundo proceso al que se encuentra sometida el agua que se va a tratar. Este capítulo comienza con la definición de este proceso, muestra gráficamente cómo funciona, se describen las aleaciones del ionizador y muestra las principales sustancias y microorganismos reducidos al utilizar este proceso durante el tratamiento del agua.

6.1 DEFINICIÓN

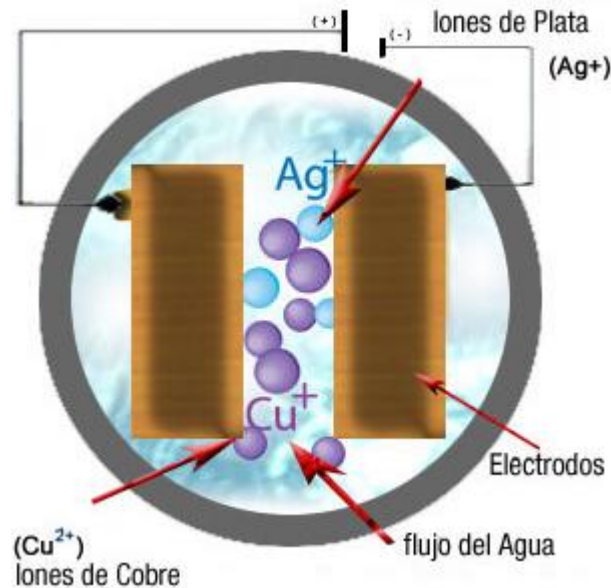
La ionización es el proceso mediante el cual se desintegra un material, átomo por átomo. Mediante este proceso uno o varios elementos pierden electrones.

6.2 IONIZACIÓN CON COBRE PLATA Y ZINC

La ionización con cobre, plata y zinc es un método utilizado para reducir los contaminantes que se encuentran presentes en el agua mediante reacciones de óxido reducción. La ionización con cobre plata y zinc funciona mediante la aplicación de corriente directa (6 V) a un par de electrodos que presentan una aleación de dichos materiales. Los electrodos se encuentran separados a una distancia pequeña por donde fluye el agua que va a ser tratada. La descarga de energía se intercala cada 30 s para cada electrodo con el fin que se desgasten a un ritmo constante. Al momento de la descarga, cierta cantidad de átomos del

electrodo energizado pierden electrones, lo que convierte a estos átomos en cationes, es decir, átomos cargados positivamente, que luego serán arrastrados por el agua hacia su almacenamiento. En la figura 17 se muestra el proceso.

Figura 17. Ionización cobre, plata y zinc



Fuente: ¿Qué es la ionización del agua?. Disponible en: <http://www.ionizadores.cl/tecnologia.htm>

6.3 PRINCIPALES SUSTANCIAS QUÍMICAS REDUCIDAS POR LOS EQUIPOS KDF

La ionización con cobre plata y zinc no sólo es utilizada para el tratamiento de agua potable sino también para el tratamiento de aguas residuales con el fin de prolongar la vida útil del agua potable. Estimaciones indican que el agua se puede mantener en su almacenamiento hasta por 30 días. La plata ha sido uno de los mayores desinfectantes que se han utilizado en la historia de la humanidad.

Por medio de este ionizador se pueden eliminar o reducir un considerable grupo de microorganismos y de sustancias químicas que pueden presentarse en el agua, mejorando así la calidad de agua de consumo. Entre las principales sustancias y microorganismos que están presentes en el agua se tienen:

- ✓ Phytophthora palmivora, el agente causal de la Pudrición del Cogollo
- ✓ Bacterias
- ✓ Algas
- ✓ Hongos (Botrytis)
- ✓ Metales pesados (mercurio, plomo, cromo, hierro, magnesio)
- ✓ Cloro
- ✓ Sulfuro de hidrógeno
- ✓ Ácido sulfhídrico (olor a huevo podrido)
- ✓ Carbonato de calcio

6.4 FUNCIONES DEL SISTEMA DE IONIZACIÓN

El sistema tiene principalmente 3 funciones:

1. Retener metales pesados por adhesión a su estructura
2. Oxidar el Fe y H_2S para luego precipitarlos
3. Eliminar microorganismos

La forma en que el sistema de ionización elimina los metales pesados y otros contaminantes es mediante reacciones químicas. Los electrones son intercambiados entre los distintos compuestos generando nuevos elementos que no representan riesgo para la vida de los consumidores.

Este sistema puede ser útil en aguas subterráneas donde existe una mayor presencia de hierro ya que es capaz de eliminarlo en porcentajes elevados. Además del hierro elimina cloro y ácido sulfhídrico. El primero se elimina mediante la reducción electroquímica de gas cloro disuelto en el agua a su forma soluble de iones cloruro, y el segundo mediante la conversión del sulfuro de hidrogeno gas a la forma insoluble sulfuro que es inerte y precipita.²⁶

El sistema además controla la proliferación de algas, bacterias y hongos que pueden ser dañinos para el sistema hidráulico. Ofrece un factor protector para el filtro. El sistema no sólo se seleccionó para cuidar la salud de las personas sino también para el buen funcionamiento de la planta. Estos sistemas son buenos combinarlos con procesos de desinfección UV.

La aleación del ionizador está compuesta por los siguientes elementos: 80% cobre, 5% plata y 15% zinc. En la figura 18 se muestra el ionizador.

Figura 18. Ionizador cobre, plata y zinc



Fuente: Copper/Silver Ionizer. Disponible en: <http://residential.fluidynecorp.ca/CSIonizer.html>

²⁶Disponible en: <http://www.lenntech.es/filtros-y-filtracion/medio-filtrante-kdf.htm#ixzz3I2aMCh6> . Consultado el 7 de Septiembre de 2014.

7. PROCESO DE FILTRACIÓN

El siguiente paso en este proceso de potabilización de agua es la filtración y sobre esta se hablará durante el desarrollo de este capítulo. La filtración es uno de los procesos más importantes, ya que con ella se pueden eliminar las partículas y microorganismos que pueden afectar tanto la calidad estética como sanitaria del agua. Con la coagulación se pudieron juntar las partículas coloidales y con ello se crearon flóculos de mayor tamaño que serán retenidos con mayor facilidad mediante la filtración.

Este capítulo comienza con las definiciones básicas del proceso de filtración, tipos de filtración, medios filtrantes más comúnmente utilizados. Más adelante se aborda sobre la hidráulica de la filtración, aquí se incluyen los cálculos de caudales, de pérdidas tanto en el proceso de filtración como en el de retrolavado. Al finalizar se hará una simulación de análisis de espesores donde se determinarán las deformaciones y las tensiones a las que se encuentra sometido el filtro.

7.1 DEFINICIÓN

El proceso de filtración es uno de los más frecuentes empleados para potabilizar aguas superficiales y subterráneas. La filtración puede ser definida como el proceso mediante el cual se remueven partículas sólidas en suspensión debido al paso del agua por medio poroso. Existen dos formas de filtración:

1. La filtración granular en la cual el medio poroso es una capa gruesa por la que fluye el agua. El medio poroso más utilizado es la arena. Así mismo este tipo de filtración se subdivide en filtración rápida y lenta, el nombre surgió debido a que la primera presenta tasas superiores de filtración (de 50 a 100 veces) con respecto a la segunda.
2. La filtración por membrana en la cual el medio poroso es de un espesor muy delgado (comúnmente menores a 1 mm). Son elaborados con material sintético, el cual contiene muchos poros pequeños por medio de los cuales el agua permea.

La filtración es un proceso que permite clarificar el agua, elimina algunos de los microorganismos que están presentes en ella y que pueden generar enfermedades en los seres humanos. Tanto las aguas superficiales como las subterráneas requieren tratamiento por filtración, es uno de los más antiguos tratamientos conocidos y también uno de los más eficaces.

El mecanismo por el cual un filtro retiene y remueve el material suspendido ha sido y explicado de distintas maneras por diferentes autores. Posiblemente el fenómeno es el resultado de la acción conjunta de diferentes acciones físicas, químicas y biológicas ocurrientes en el filtro con mayor o menor intensidad según el tipo de filtro y la calidad del agua filtrada.²⁷

En este proyecto de grado se utilizará la filtración granular rápida porque esta requiere menos tiempos de filtración y con ello se obtienen mayores cantidades de agua en un menor tiempo posible. Sobre este tema se hablará en este capítulo.

²⁷ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIPURIFICACIÓN: Diseño de sistemas de purificación de aguas. 2 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. 308p.

7.2 FILTRACIÓN RÁPIDA

El proceso de filtración rápida ocurre en dos etapas: la primera etapa es aquella durante la cual el agua pasa a través del lecho filtrante donde el filtro cumple su función de atrapar y acumular las partículas y una etapa de retrolavado en la cual el material acumulado durante la filtración es eliminado del lecho filtrante.

Inicialmente el lecho se encuentra limpio y el agua lo atraviesa por acción de la gravedad. El agua va atravesando el sistema y llega un momento en el cual es tal la cantidad de partículas y sólidos en el filtro que se obstruye demasiado los poros por donde el agua solía circular; con esto comienza un aumento paulatino en la pérdida de carga hasta que llega a un valor tal que hace necesario su lavado. Para solucionar el problema anterior se hace necesario utilizar el retrolavado que no es más que invertir el sentido de flujo del agua, es decir, esta vez el agua circulará de abajo hacia arriba y limpiará el lecho filtrante.

7.3 MEDIO FILTRANTE²⁸

El medio ideal para la filtración debe poseer las siguientes características:

- ✓ Ser lo suficientemente grueso para tener intersticios entre los granos con gran capacidad de almacenamiento.
- ✓ Pero a la vez, lo suficientemente fino para retener el paso de los sólidos suspendidos.

²⁸VERA BRITO Nancy. Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de México. Instituto Politécnico Nacional Tesis para obtener el título de Ingeniero civil. México 2007. [en línea] Disponible en <http://www.elaguapotable.com/ALTERNATPOTAB.pdf>. Consultado el 4 de Octubre de 2014.

- ✓ Una altura suficiente para proporcionar la duración de corrida deseada.
- ✓ Una graduación adecuada para permitir un lavado eficiente.

Como medio se utiliza arena, antracita, tierra de diatomeas, perlita y carbón activado en polvo o granulado. Un filtro se puede rellenar con un solo tipo de medio o una combinación de éstos. El medio más común empleado es la arena sílice y para filtros duales, arena con antracita. Se emplea carbono activado como medio filtrante cuando se pretende no sólo eliminar los sólidos en suspensión, sino también los materiales disueltos por adsorción.

También el medio filtrante ideal para los filtros granulares profundos debe ser de un tamaño tal que retenga una gran cantidad de sólidos suspendidos y pueda limpiarse fácilmente por retrolavado. Estos prerrequisitos no son compatibles y debe llegarse a un equilibrio. Una arena muy fina puede permitir obtener un efluente de excelente calidad pero impide la penetración de sólidos en el lecho; con lo cual se desaprovecha la capacidad de almacenaje del medio granular. Las arenas más gruesas dan tiempos más largos de funcionamiento, menor calidad del efluente y mayor facilidad de lavado, aunque para ello se requiere un mayor caudal de agua de lavado para expandir al medio y transportar los sólidos, que se internan a una mayor profundidad en el medio, hasta el sistema de desagüe.

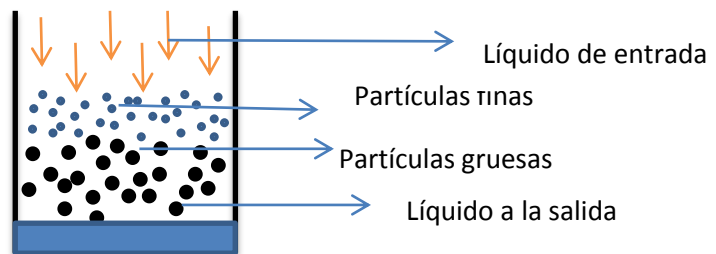
7.4 FILTRO DE LECHO PROFUNDO

Este tipo de filtro es útil principalmente en casos en los que pequeñas cantidades relativas de sólidos se separan de grandes cantidades de agua y clarifica el líquido. Con frecuencia, las capas inferiores se componen de piezas burdas de grava que descansan sobre una placa perforada o con ranuras.²⁹

²⁹ GEANKOPLIS, C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera Edición. Compañía editorial continental S.A. de C.V. México, 1998.

En la filtración de lecho profundo los impactos entre las partículas y la superficie del medio son las mayores responsables de su remoción y retención. Este tipo de filtración es comúnmente utilizado para remover partículas de suspensiones muy diluidas, donde no es importante recuperar las partículas³⁰. En la figura 19 se muestra un esquema general de un lecho filtrante

Figura 19. Esquema general de un lecho filtrante



Existen dos formas de pérdidas en los filtros, cuando éste está limpio, recién retrolavado, y cuando está a su máximo llenado.

7.5 ELIMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN FILTROS DE LECHOS PROFUNDOS

La eliminación de los sólidos suspendidos depende de varios factores, entre ellos:

- ✓ La cantidad y el tipo de los sólidos en suspensión
- ✓ La tasa de filtración
- ✓ El tamaño de las partículas

³⁰ COULSON, Richardson. Chemical engineering Volume 2. Particle technology and separation processes. Editorial Butterworth Heinemann. 5 Edición.

- ✓ Fracción de huecos (porosidad)
- ✓ El tiempo

7.5.1 Tasa de filtración. La tasa de filtración se define como la cantidad de flujo que atraviesa el lecho filtrante dividido entre el área del mismo. En el SI sus unidades son m/h. Se define mediante la siguiente expresión

$$V_f = \frac{Q}{A_F} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

V_f Es la tasa de filtración [m/s]

A_F Es el área del tanque vacío [m^2]

Q Es el caudal en [m^3/s]

7.5.2 Porosidad. Se define como la relación entre el volumen de huecos y el volumen total del lecho filtrante.

$$\varepsilon = \frac{\text{volumen de huecos}}{\text{volumen total del lecho}} \quad \text{Ec. 7}$$

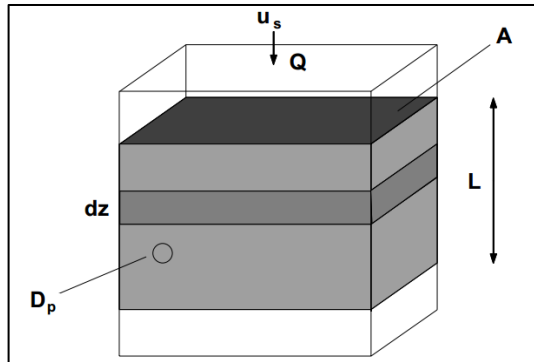
Dónde:

ε Es la porosidad [adimensional]

Volumen en unidades compatibles

Debido a su definición, su valor se sitúa entre los valores de cero y uno. Este factor cambia cuanto más partículas suspendidas en el filtro. En la figura 20 se muestra la caracterización de un lecho filtrante.

Figura 20. Caracterización de un lecho filtrante



Fuente: Depth (or Deep-Bed). Disponible en: Filtration <http://cpe.njit.edu/dlnotes/CHE685/CIs09-1.pdf>

7.5.3 Diámetro efectivo de la partícula. El diámetro efectivo de la partícula se define como:

$$D_p = 6 * \frac{V_p}{A_p} \quad \text{Ec. 8}$$

Dónde:

D_p Es el diámetro efectivo de la partícula en $[m]$

V_p Es el volumen de medio de las partículas $[m^3]$

A_p Es el área superficial del medio de partícula m^2

7.5.4. Esfericidad. La esfericidad es la medida única más útil para caracterizar la forma de partículas irregulares y otras no esféricas³¹. Se define como:

$$\Phi = \frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \quad \text{Ec. 9}$$

Φ Es la esfericidad [adimensional]

³¹ LEVENSPIEL, O. Flujo de fluidos. Intercambio de calor. Capítulo 6. Flujo a través de lechos rellenos, Editorial Reverté, 1996.

La superficie en unidades compatibles

7.5.5 Número de Reynolds a través de las partículas. El número de Reynolds es un factor adimensional que indica cómo se comporta un fluido a través de un medio. En un medio filtrante se define mediante la siguiente expresión.

$$Re_p = \rho * D_p * \frac{V_f}{\mu} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

Re_p Es el número de Reynolds en las partículas [adimensional]

ρ Es la densidad del agua en $[\frac{kg}{m^3}]$

D_p Es el diámetro efectivo de la partícula en $[m]$

V_f Es la tasa de filtración en $[\frac{m}{s}]$

μ Es la viscosidad dinámica del agua en $[\frac{kg}{m*s}]$

Se ha encontrado experimentalmente que:

En la tabla 8 se muestran los números de Reynolds laminar y turbulento cuando pasa el agua a través de los lechos filtrantes

Tabla 8. Reynolds laminar y turbulento lecho filtrante

TIPO DE FLUJO	ECUACIÓN
LAMINAR	$\frac{Re_p}{1-\epsilon} < 10$ Ec. 11
TURBULENTO	$\frac{Re_p}{1-\epsilon} > 1000$ Ec. 12

Fuente: Theory and practice of Water and Wastewater Treatment 1997

7.5.6. Factor de fricción a través de un medio granular. Los factores de fricción en un medio granular también dependen del estado en que se encuentra el fluido, es decir, laminar o turbulento. En la tabla 9 se muestran los factores de fricción para los flujos laminares y turbulentos en un lecho filtrante.

Tabla 9. Factor de fricción laminar y turbulento lecho filtrante

TIPO DE FLUJO	ECUACIÓN
Laminar	$f_p = \frac{75}{Re_p} * \left[\frac{1-\varepsilon^2}{\varepsilon^3} \right]$ Ec. 13
Turbulento	$f_p = \frac{0,875}{\varepsilon^3} \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}$ Ec. 14

Fuente: Theory and practice of Water and Wastewater Treatment 1997

Dónde:

f_p Es el factor de fricción [adimensional]

ε Es la porosidad [adimensional]

Re_p Es el número de Reynolds en las partículas [adimensional]

7.5.7 Ecuación de Ergun. En el año de 1952, un científico desarrolló una fórmula para calcular las pérdidas de presión dentro de un lecho filtrante, conocida como ecuación de Ergun:

$$h_{LF} = K_v \cdot \frac{(1 - \varepsilon_1)^2}{\varepsilon_1^3} \cdot \mu_f \cdot L_F \cdot \frac{v_f}{\rho \cdot g \cdot d_M^2} + k_L \cdot \left[\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1^3} \right] \cdot L_F \cdot \frac{v_f^2}{g \cdot d_M} \quad \text{Ec. 15}$$

Dónde:

k_v = coeficiente de Ergun para viscosidad

k_L = coeficiente de pérdidas inerciales

ε_1 = porosidad

$\mu_f = \text{viscosidad en } \left[\frac{kg}{m * s}\right]$

$L_F = \text{longitud del lecho filtrante en}$

$v_F = \text{tasa de filtración}$

$\rho = \text{densidad del líquido}$

$g = \text{gravedad}$

$d_M = \text{diámetro del medio}$

Esta fórmula fue desarrollada y abarca un rango de número de Reynolds que se extiende desde un $Re = 1$ hasta uno de 2000. Como se puede ver la pérdida de fricción depende de la porosidad del lecho, de la viscosidad de la profundidad del lecho filtrante, de la tasa de filtración, la gravedad y el diámetro del medio. El primer término de la ecuación representa el flujo laminar y el segundo el turbulento. La ecuación 15 sólo se utiliza para calcular las pérdidas de presión cuando el filtro se encuentra recién retrolavado.

Para calcular las pérdidas de un filtro multicapa y de diferente materiales, se necesita hacer una sumatoria de los términos anteriores. Así, para el filtro de este proyecto se tiene arena de sílice y grava. Por lo tanto:

$$h_{Ltotal} = \sum_{i=1}^n h_{li} \quad \text{Ec. 16}$$

Dónde:

h_{Ltotal} Es la pérdida total de carga en el filtro en $N * \frac{m}{N}$

h_{li} Es la pérdida por capa particular en $N * \frac{m}{N}$

Las pérdidas totales en nuestro filtro serían igual a las sumas de las pérdidas en el medio filtrante de sílice (20/30 y 30/40) y las pérdidas en la grava ($\frac{1}{2}$ "-1/4" y $\frac{1}{4}$ -1/8).

En la tabla 10 se muestra las características de algunos componentes de los lechos filtrantes como la esfericidad, la densidad, porosidad.

Tabla 10. Características de algunos componentes de los lechos filtrantes

Características del medio filtrante					
Material	Forma	Esfericidad Φ	Densidad específica	Porosidad ϵ	d_{10}
Arena sílica	Redonda	0,82	2,65	0,42	0,4-1,0
Arena Sílica	Angular	0,73	2,65	0,53	0,4-1,0
Arena Ottawa	Esférica	0,95	2,65	0,4	0,4-1,0
Grava	Redonda	-	2,65	0,4	1-50
Granate	-	-	3,1-4,3	-	0,2-0,4
Antracita aplastada	Angular	0,72	,50-1,75	0,55	0,4-1,4

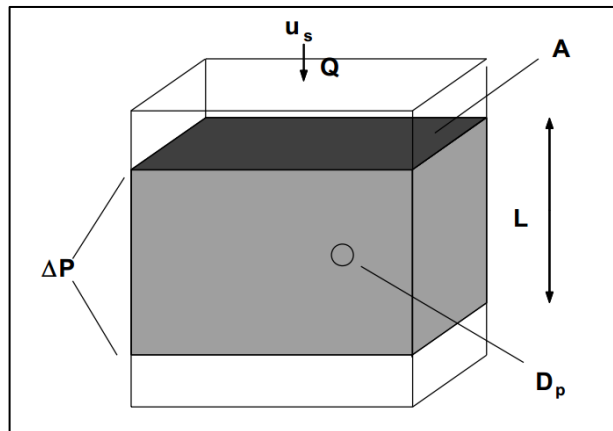
Fuente: Theory and practice of Water and Wastewater Treatment 1997

Las pérdidas de carga en el filtro se pueden dividir en dos:

1. Aquellas que se dan cuando el filtro está recién retrolavado, es decir, una vez eliminadas las partículas depositadas (lo mencionado anteriormente).
2. Cuando a estas pérdidas se les suma cuando el lecho filtrante acumula sólidos

En la figura 21 se muestra un esquema de los parámetros de diseño en los lechos filtrantes. Se puede ver cómo son importantes el caudal de diseño Q , la pérdida de presión ΔP , el diámetro de grano D_p , L la longitud, A el área superficial y V_s la velocidad del agua.

Figura 21. Parámetros para el diseño de lechos filtrantes



Fuente: Depth (or Deep-Bed). Disponible en: [Filtrationhttp://cpe.njit.edu/dlnotes/CHE685/CIs09-1.pdf](http://cpe.njit.edu/dlnotes/CHE685/CIs09-1.pdf)

7.6 RETROLAVADO

De acuerdo a los criterios de retrolavado (la expansión debe ser del 15 al 30% de la longitud del lecho filtrante). Se escoge un punto intermedio del 20%. Entonces la longitud cuando se encuentra expandido el lecho filtrante será:

$$L_E = L_F + RE * L_F \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

L_E Es la longitud expandida en [m]

RE Es la expansión

L_F Es la longitud del lecho filtrante

La relación entre la expansión del lecho filtrante y la viscosidad se determina mediante la ecuación 18

$$\frac{L_E}{L_F} = \frac{1 - \varepsilon_F}{1 - \varepsilon_E}$$

Donde

ε_F Es la porosidad antes del retrolavado

ε_E Es la porosidad después del retrolavado

En la tabla 11 se muestra la porosidad de algunos tipos de arena a incipiente fluidización (proceso mediante el cual un flujo suspende partículas sólidas mediante una corriente de líquido o gas).

Tabla 11. Porosidad a incipiente fluidización

Porosidad a incipiente punto de Fluidización				
	Tamaño de partícula (mm)			
	0,06	0,10	0,20	0,40
Material	Porosidad a incipiente fluidización			
Arena $\Phi=0,67$	0,6	0,58	0,53	0,49
Arena $\Phi=0,86$	0,53	0,48	0,43	0,42
Antracita $\Phi=0,63$	0,61	0,6	0,56	0,52

Fuente: After Leva et al, US.Bur.Mines Bull, 1951

PÉRDIDA DE PRESIÓN DURANTE EL RETROLAVADO

De la ecuación de Ergun se tiene para el retrolavado que

$$\Delta P_{mf} = \frac{150}{Re} * (1 - \varepsilon_E) + 1,75 * \frac{1 - \varepsilon_E}{\varepsilon_E^3} * \frac{L}{D_p} * \rho * U_s^2$$

Ec. 19

Esta ecuación permite calcular las pérdidas durante el retrolavado

Dónde:

ΔP_{mf} Es la pérdida de presión durante el retrolavado en $[N * \frac{m}{N}]$

Re Es el número de Reynolds [adimensional]

ε_E Es la porosidad del lecho expandido [adimensional]

L Es la longitud del lecho filtrante en [m]

D_p Es el diámetro de partícula en [m]

ρ Es la densidad del agua en $[kg/m^3]$

U_s Es la velocidad de retrolavado en [m/s]

7.7 CRITERIOS DE DISEÑO

Existen varios criterios que se necesitan al momento de diseñar, seleccionar y/o escoger el filtro. Los siguientes parámetros se tienen en cuenta:

- ✓ Tasa de filtración: Esta depende del caudal que se vaya a diseñar, este filtro maneja un caudal de 500 l/h y tiene una sección circular.
- ✓ Forma del filtro: es común encontrar diseños de filtros de forma rectangular o cilíndrica. En el caso particular de este filtro, se optó por la forma cilíndrica.
- ✓ Pérdida total de filtros, estas incluyen las pérdidas después del retrolavado más las pérdidas cuando se tienen partículas suspendidas en el lecho filtrante.
- ✓ Requieren un proceso de coagulación antes del proceso, para esto se tiene el sistema floculante con sulfato de aluminio en el capítulo 5.
- ✓ La longitud de expansión en el retrolavado no debe ser superior al 15-30%.

7.8 CÁLCULOS DEL FILTRO

Se diseñó la planta para un caudal de 500 l/h. El diámetro de la sección es de 46 cm. Con esto se puede calcular la tasa de filtración, mediante el cálculo del área. Entonces, se acomodan unidades y se calcula la tasa de filtración.

$$Q = v \cdot A$$

$$A_F = \frac{\pi * d^2}{4} = 0,1696 \text{ m}^2$$

$$V_f = \frac{0,5 \text{ m}^3}{0,1696 \text{ m}^2 * h} = 2,94 \text{ m/h}$$

En la literatura recomiendan valores de tasa de filtración que están entre los [2,4 m/h-24 m/h], lo cual indica que está en el rango. Cabe recordar que esta es para aplicaciones pequeñas.

Se calculan las propiedades del agua a una temperatura de 20°C y la presión atmosférica. Estos datos se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Propiedades agua a T= 20°C y P=100 kPa

Propiedad	Valor
Densidad	998,2 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Viscosidad dinámica	0,001002 $\frac{kg}{m*s}$
Viscosidad cinemática $\nu = \frac{\mu}{\rho}$	0,000001004 $\frac{m^2}{s}$

Fuente: EES

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

7.9 SELECCIÓN DEL MEDIO FILTRANTE

La selección del medio filtrante es determinada por la durabilidad requerida, el grado deseado de la purificación, la duración de la carrera del filtro y la facilidad deseable de su lavado.³²

En una arena gruesa la permeabilidad es mayor que en una arena fina aunque la porosidad, y el volumen de vacíos, sean igual. Los poros pequeños de la arena fina causan mayor resistencia al flujo, o sea menor permeabilidad.³³

Una arena puede poseer partículas del mismo tamaño, es decir, gradación uniforme; o puede estar constituida por partículas que van desde tamaño fino hasta grueso, gradación no uniforme. La arena de gradación uniforme posee mayor porosidad que una no uniforme, y por ello, mayor permeabilidad.³⁴

El diseño del filtro es estratificado, es decir, las capas superiores son más finas y su tamaño va creciendo hacia el fondo. La profundidad del medio. La profundidad del lecho filtrante es de 60 [cm]. Las dos primeras capas son de arena y las dos últimas de grava.

³² KAWUAMURA S., Design and Operation of High Rate Filters, J. AWWA, vol. 67.p. 535, octubre 1975.

³³ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIPURIFICACIÓN: Diseño de sistemas de purificación de aguas. 2 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. 308p.

³⁴ Ibid 308p.

7.10 GRANULOMETRÍA SELECCIONADA

La granulometría seleccionada para este filtro presenta las siguientes características:

1. Se seleccionó dos tipos de tamaño de granulometrías de arena sílice, una malla de 20/30 y otra de malla 20/40.
2. Al igual que con la arena sílice, con la grava se escogieron dos tipos de granulometría distintas granulometrías una de $\frac{1}{2}$ "-1/4" y otra de $\frac{1}{4}$ -1/8 ".

Con esta granulometría garantizamos una micro filtración y las partículas mayores a las $600\mu m$ quedan retenidas.

7.10.1 Arena sílice. Es un mineral de cuarzo sólido y granular que se utiliza en filtración de agua para potabilización y en otras aplicaciones. La arena 20-30 es un tipo de arena normalizada que está graduada para pasar por el tamiz de $850\mu m$ (No. 20) y ser retenida por el tamiz de $600\mu m$ (No.30). De la misma forma la arena 20-40 es otro tipo de arena normalizada que permite que la arena pase por el tamiz de $850\mu m$ (No. 20) y es retenida por el tamiz de $425\mu m$ (No. 40), por tanto se es más fina.

Sin lugar a dudas, la arena es el medio que más se utiliza como medio filtrante por su bajo costo. La profundidad de estos varía de los 40 a los 75 cm. En la figura 22 se aprecia la arena.

Figura 22. Arena sílice



Fuente: Arena sílica. Disponible en: www.rogersands.com

7.10.2 Grava. La grava es una roca que tiene un tamaño que comprende los 2 y 64 mm. Se utiliza en los procesos de filtración de agua. La grava presenta principalmente dos funciones:

1. Se utiliza para que el material del lecho filtrante no se pierda por medio del proceso de filtración
2. Hace que al momento del retrolavado el agua se distribuya uniformemente, es decir, reduce la velocidad durante este proceso lo que hace que la arena se eleve suavemente.

El lecho de grava está conformado por dos capas: una inferior de mayor tamaño de grano y otra más fina en la parte superior.

En la tabla 13 se muestran los valores típicos para las profundidades de los lechos filtrantes, estos valores pueden variar de acuerdo al criterio del diseñador.

Tabla 13. Lecho típico de grava para sistema de drenaje de tuberías

Descripción	Número de la capa				
	1	2	3	4	5
Profundidad de la capa en [cm]	10	7,5	7,5	10	10
Abertura de la malla cuadrada den pulgadas					
Pasando	1	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
Retenida	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$

Fuente: ACUIPURIFICACIÓN

En la figura 23 se muestra una cantidad típica de grava

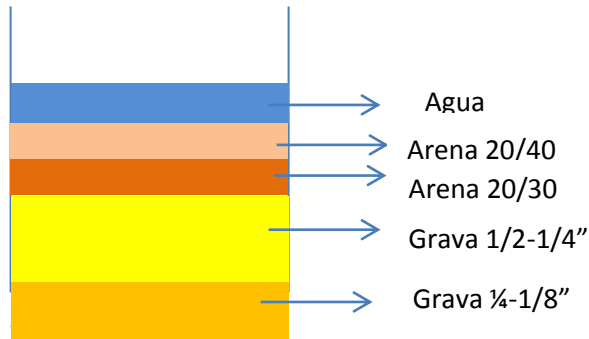
Figura 23. Grava



Fuente: Arenas sílicas clasificadas. Disponible en: www.essa-silicas.com.mx

En la figura 24 se observa el diagrama del filtro que se utilizó para nuestro lecho filtrante, como se puede ver es un filtro multicapa formado por dos capas de arena sílice y una de grava, para un total de 4 capas.

Figura 24. Diagrama del filtro



7.11 PÉRDIDAS DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN

Para determinar las pérdidas se utiliza la ecuación de Ergun:

$$h_{LF} = K_v \cdot \frac{(1 - \varepsilon_1)^2}{\varepsilon_1^3} \cdot \mu_f \cdot L_F \cdot \frac{v_f}{\rho \cdot g \cdot d_M^2} + k_l \cdot \left[\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1^3} \right] \cdot L_F \cdot \frac{v_f^2}{g \cdot d_M}$$

Donde k_v y k_l son unas constantes que valen 150 y 1,75 respectivamente.

Se calculan las pérdidas para medio filtrante para los cuatro medios filtrantes. Los resultados se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Características de los lechos filtrantes

MEDIO FILTRANTE	LONGITUD [cm]	d_M [m]	PÉRDIDA h_L [m]
Arena 20/40	10	0,000601	0,01591
Arena 20/30	10	0,0007141	0,01129
Grava 1/4 - 1/8	15	0,0049	0,0001498
Grava 1/2- 1/4	15	0,00898	0,0005619
	50		0,02791

Las anteriores son las pérdidas iniciales, es decir, cuando el filtro se encuentra limpio o recién retrolavado. Sin embargo, se tiene que establecer un criterio máximo de pérdidas una vez el sistema esté en funcionamiento. Para filtros de arena rápido se recomiendan pérdidas de 2- 3m. Kawamura recomienda cabezas de 1,8 [m].

7.12 HIDRÁULICA Y CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE LAVADO

La expansión del lecho filtrante es otro parámetro de diseño, algunos autores indican que para la arena las expansiones no deben ser superiores de un 40%. Baylis recomienda una expansión del arena del 50%.

$$R_E = (L_E - L_F) / L_F \quad \text{Ec. 20}$$

Kawamura recomienda un valor óptimo para la relación de expansión R_E que se define mediante la ecuación 21

$$R_e = \frac{0,6 - \varepsilon_F}{0,4} \quad \text{Ec. 21}$$

Si $\varepsilon_F = 0,45$ (Porosidad promedio de la arena), se obtiene entonces:

$$R_E = 0,375$$

Es decir, que su longitud en expansión L_E sería de:

$$L_E = L_F + R_E * L_F = 20 + 0,375 * 42,5 = 0,275 \text{ [cm]}$$

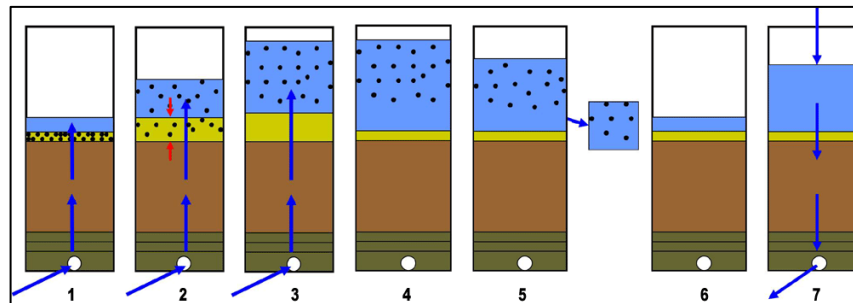
Teniendo en cuenta que la masa total de partículas permanece constante, tanto en el lecho fijo y expandido, se puede encontrar una relación entre las porosidades y las profundidades del lecho filtrante³⁵. De acuerdo a la ecuación 22

$$\frac{L_E}{L_F} = \frac{1-\varepsilon_F}{1-\varepsilon_E} \quad \text{Ec. 22}$$

De aquí se encuentra que la porosidad expandida es $\varepsilon_E = 0,6$

En la figura 25 se muestra un proceso típico de retrolavado, como se ve el agua entra por la parte inferior del lecho y atraviesa la grava y la arena, esta sufre una expansión debido al caudal que entra hasta llegar a un máximo. Luego comienza a descender cuando se termina el proceso y se vuelve a asentar.

Figura 25. Retrolavado



Fuente: Normal cleaning of the MSSF. Disponible en: <http://www.oasisfilter.com/cleaning.htm>

Existen tres tipos de pérdidas cuando el filtro se lava. Entre ellas se tienen:

- ✓ Pérdida de carga durante el lecho expandido, h_{le}
- ✓ Pérdida de carga a través del lecho de grava, h_g

³⁵ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIPURIFICACIÓN: Diseño de sistemas de purificación de aguas. 2 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. 308p.

✓ Pérdidas a través de tuberías y accesorios.

Según Dixon, las pérdidas de carga durante el lecho expandido y a través del lecho de grava se pueden calcular mediante la ecuación 23

$$h_{le} = L * (1 - \varepsilon_F) * (DR - 1) \quad \text{Ec. 23}$$

Dónde:

h_{le} Es la pérdida de carga durante el lecho expandido

ε_F Es la porosidad

DR Es la densidad relativa del medio filtrante

Con DR =densidad relativa del medio filtrante, la arena tiene una densidad relativa de 2,65, entonces:

Para la grava, Dixon establece la siguiente expresión.

$$h_g = V_b * \frac{L_g}{3} \quad \text{Ec. 24}$$

Donde V_b es la velocidad de lavado en $\frac{m}{min}$

L_g , es la longitud de la grava [m]

h_g , pérdida en [m]

En la tabla 15 se resumen las pérdidas durante el retrolavado, estas son las pérdidas del lecho expandido y las pérdidas a través del lecho de grava. La suma de las dos da las pérdidas totales del filtro durante su lavado.

Tabla 15. Pérdida en lecho filtrante

TIPO DE PÉRDIDA	VALOR [m]
Pérdida de lecho expandido h_{le}	0,1815
Pérdida a través de lecho de grava h_g	0,01042
Pérdidas totales en el filtro	0,19192

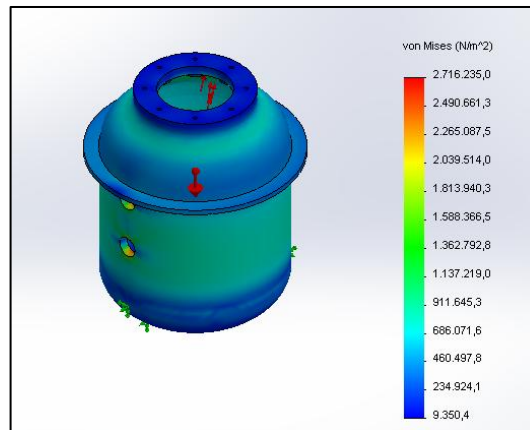
7.13 ANÁLISIS DE ESPESORES

En el diseño del filtro un parámetro importante es su espesor, por lo que fue necesario hacer un análisis para saber si el material que se seleccionó resiste los esfuerzos a los que fue expuesto. El cálculo es bastante complejo en la forma analítica, por tal motivo se recurrió al software SolidWorks 2012 para que calculara los esfuerzos por medio de elementos finitos. En la simulación se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

En primer lugar se seleccionó el fondo del filtro como sujeción fija ya que este va acoplado al fondo de la estructura, esto se indica en la figura mediante las flechas verdes. Para las cargas externas se toman en cuenta tres variables: la gravedad, la masa del lecho filtrante (150kg) y la presión atmosférica 100 kPa.

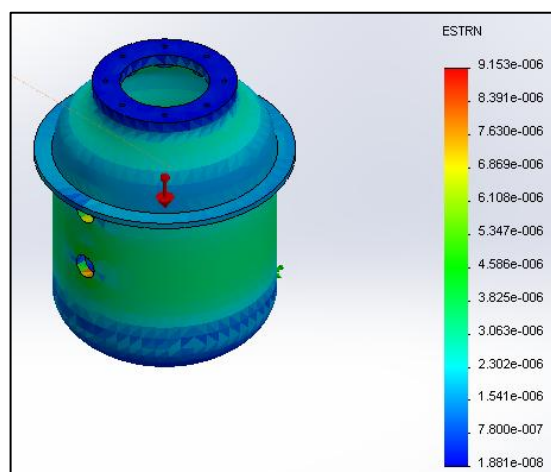
Las propiedades del material que se tuvieron en cuenta para la simulación se encuentran en la tabla 5 en el capítulo 3 del libro. En la figura 26 se muestra la solución CAE para el campo de tensiones del filtro

Figura 26. Solución CAE para las tensiones en el filtro



De los resultados se puede concluir de $9350 \frac{N}{m^2}$ y uno máximo de $2'716.235 \frac{N}{m^2}$ valores muy inferiores a nuestro límite elástico lo cual es importante. Adicionalmente se hizo un análisis de deformación que nos indican que el máximo desplazamiento se encuentra en la zona central de la pieza y tiene un valor de $1,029e-3$ mm, lo cual es un valor muy pequeño y aceptable. En la figura 27 se muestra gráficamente el campo de deformaciones.

Figura 27. Gráfica de deformaciones



8. DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO

Este capítulo se centrará en el diseño del sistema hidráulico. El capítulo comienza con algunas definiciones básicas de la mecánica de fluidos y continúa con las especificaciones que presenta el sistema, es decir, los elementos constitutivos. Más adelante se calcularán las pérdidas del sistema durante la filtración y el retrolavado y se dará una explicación detallada del funcionamiento de la planta portátil de tratamiento de agua.

8.1 DEFINICIONES BÁSICAS Y CÁLCULOS

ECUACIÓN DE BERNOULLI: demostrado por Daniel Bernoulli y soportada por el principio de la conservación de la energía, esta ecuación describe el comportamiento de un fluido en movimiento a través de una corriente de agua. En un elemento de un fluido, existen tres formas de energía

1. Energía potencial, al tener una altura y estar referenciada respecto a un sistema.
2. Energía cinética. Al tener una velocidad la corriente del fluido.
3. Energía de flujo, también conocida como energía de presión.

La ecuación 25 expresa matemáticamente la ecuación de Bernoulli. En la figura 28 se puede ver gráficamente los parámetros que intervienen en esta ecuación.

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 25}$$

Dónde:

P_1 y P_2 Son las presiones antes y después en Pa

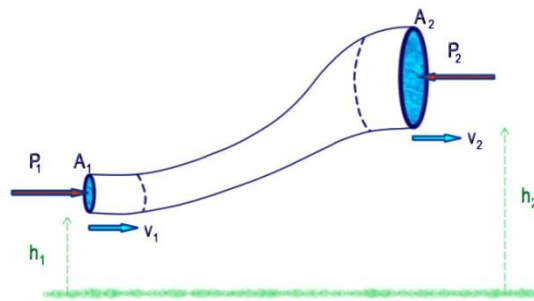
γ Es el peso específico en $\left[\frac{N}{m^3}\right]$

V_1 y V_2 Son las velocidades antes y después en $\left[\frac{m}{s}\right]$

g Es la gravedad

z_1 y z_2 son las alturas respecto a un sistema de referencia en [m]

Figura 28. Principio de Bernoulli



Fuente: Tubo de Pitot en los aviones. Disponible en: <http://abcienciade.wordpress.com/2009/06/19/tubo-de-pitot-en-los-aviones/>

Esta ecuación sirve para hacer un análisis teórico de un fluido en movimiento, pero esto no pasa en la realidad, ya que se tienen que tener en cuenta las pérdidas de presión e irreversibilidades que se presentan en un sistema real, con ello se determina la ecuación general de la energía para un fluido en movimiento, así reescribimos la ecuación anterior y se tiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 26}$$

Donde h_L son todas las pérdidas de energía debido a la fricción del fluido por los conductos, pérdidas en accesorios, entre otros.

Sin embargo, también pueden haber adiciones o remociones de energía por parte de dispositivos mecánicos que se encuentren en el circuito, se está hablando particularmente de bombas y motores que son los elementos que más comúnmente son encontrados en los sistemas hidráulicos, así se vuelve a escribir la ecuación general de la energía adicionando los dos términos mencionados anteriormente y se tiene finalmente la ecuación general de la energía para un fluido en movimiento

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + h_A - h_R - h_L = \frac{P_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 27}$$

Donde h_A es la energía adicionada por un elemento mecánico, y h_R es la energía extraída del fluido por un elemento mecánico.

NÚMERO DE REYNOLDS

Antes de definir las pérdidas debidas a la fricción de un flujo de un fluido a través de un tubo o canal, es importante definir primero qué es el número de Reynolds ya que las pérdidas dependen de si el flujo es laminar (el fluido parece moverse en láminas con poca mezcla entre las capas) o turbulento (el fluido tiende a moverse de manera desordenada y caótica, los elementos del fluido se mezclan) como se verá más adelante.

Se sabe por experimentación que el comportamiento de un fluido en un tubo redondo depende de cuatro variables: densidad del fluido ρ , viscosidad μ , el diámetro del tubo D y la velocidad promedio del flujo v . Con esto se define el número de Reynolds de la siguiente manera³⁶

$$N_R = v \cdot D \cdot \frac{\rho}{\mu} \quad \text{Ec. 28}$$

Como se sabe, el número de Reynolds es adimensional y requiere que su cálculo se realice en unidades compatibles.

Particularmente para flujos en tuberías se tienen que tener los números de Reynolds críticos, es decir, aquellos que definan el flujo como turbulento, laminar o que se encuentra en estado de transición (paso de laminar a turbulento, ni laminar, ni turbulento). Un flujo será laminar si su número de Reynolds es menor que 2000, será turbulento si su cálculo da un valor superior a los 4000, y se encontrará en la zona de transición si se encuentra entre esos dos límites.³⁷

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

A continuación se muestra cómo se calcula las pérdidas por fricción en una tubería, es así como se enunciará la ecuación de Darcy.

- ✓ Ecuación de Darcy: con esta ecuación se puede calcular la pérdida debida a la fricción del fluido al paso por las tuberías. Se define como:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 29}$$

³⁶ MONTT, Robert L. Mecánica de Fluidos. 6 ed. México: Pearson Educación, 2006. 644p.

³⁷ Ibid

Donde f es el factor de fricción adimensional, L es la longitud del tubo, D es el diámetro, v es la velocidad del fluido y g es la gravedad. Esta fórmula se puede utilizar tanto para flujo laminar como turbulento y la diferencia está en la forma como se calcula este factor de fricción, con esta ecuación se pueden calcular las pérdidas en secciones rectilíneas de una tubería.

Para flujo laminar el factor de fricción se puede calcular mediante la siguiente expresión que se da en la ecuación 30.

$$f = \frac{64}{N_R} \quad \text{Ec. 30}$$

En cuanto al factor de fricción para flujo turbulento se puede utilizar la ecuación que desarrollaron P.K. Swamee y A.K. Jain y que se da en la ecuación 31.

$$f = \frac{0,25}{\log^2 \left[\frac{1}{3,7 \cdot \frac{D}{\epsilon}} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right]} \quad \text{Ec. 31}$$

Dónde:

ϵ Es la rugosidad en [m]

PÉRDIDAS MENORES

A las pérdidas causadas por las tuberías se les tienen que sumar otras tipos de pérdidas de energía llamadas “pérdidas menores” que están relacionadas con pérdidas asociadas a accesorios que tiene el sistema hidráulico como codos, té, válvulas o a expansiones o compresiones en la sección del tubo.

Por lo general, estas pérdidas de energía se reportan en términos de un coeficiente de resistencia K como en la ecuación 32³⁸.

$$h_{LL} = k \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad \text{Ec. 32}$$

Dónde:

h_{LL} Es la pérdida en determinado accesorio en $[(N * m)/N]$

K Es el coeficiente de resistencia

No vale mencionar todos los tipos de pérdidas y simplemente se calcularán los que se necesiten para el cálculo del sistema actual.

8.2 ELEMENTOS CONSTITUTIVOS SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico está conformado por varios elementos, éstos son:

- ✓ Bomba centrífuga
- ✓ Tuberías
- ✓ Codos
- ✓ Uniones machos
- ✓ Válvula multiport
- ✓ Soportes tuberías

En la tabla 16 se muestran los elementos constitutivos del sistema hidráulico

³⁸ Ibid

Tabla 16. Elementos del sistema hidráulico

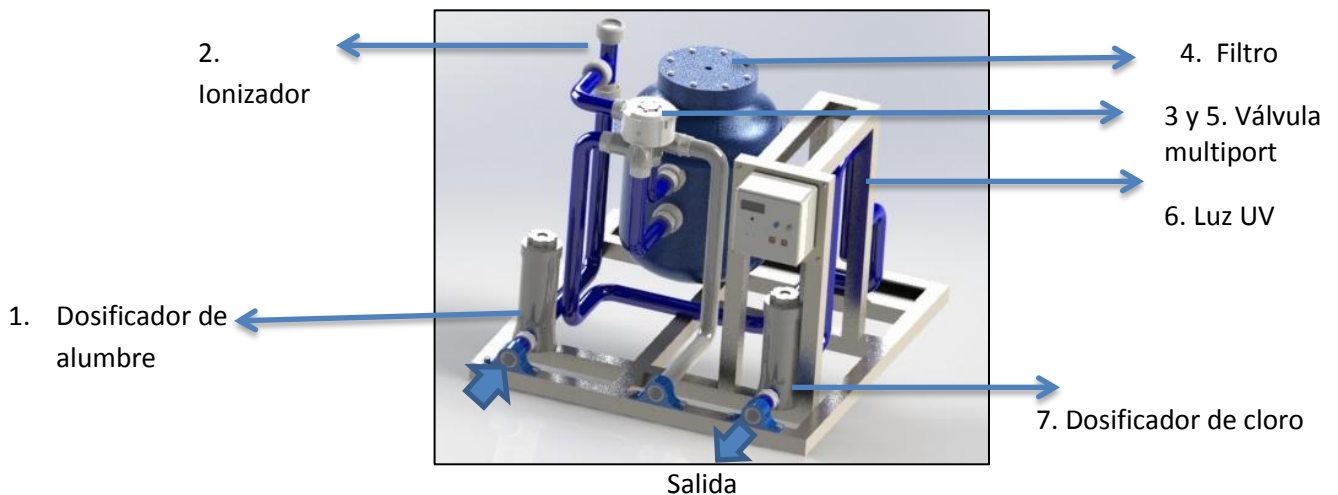
Elemento	Cantidad	Especificación	Descripción
Bomba centrífuga 	1	Caudal :500 l/h	Es una máquina que se utiliza para bombear líquidos
Tuberías 	N.A	Tuberías de PVC de 1½" RDE21	Por medio de la cual se dirige el flujo por todo el sistema, desde la entrada del agua cruda hasta su salida
Codos 	15	De 1½" de PVC	Cambia la dirección del flujo en una tubería
Uniones macho 	9	De 1½" de PVC	Un elemento de unión entre tuberías, para desarmar planta fácilmente en caso de daño de alguno de sus elementos
Válvula Multiport 	1	De 1 1/2 " de PVC	Es el corazón central del sistema hidráulico.
Válvula de alivio	1	De 1"	Sirve para purgar el sistema hidráulico antes de la puesta en marcha

LÍNEAS DE TUBERÍAS

Las tuberías están formadas por dos líneas o ramas básicas:

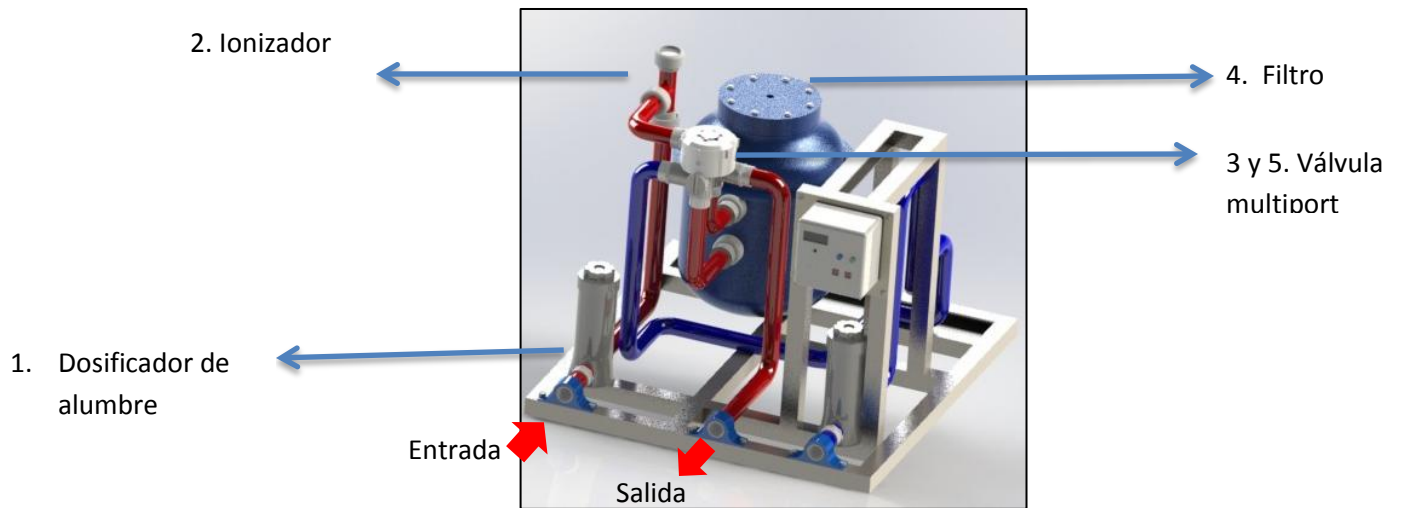
1. La primera línea es en la que se realiza el proceso (tratamiento), es decir sigue el ciclo floculante-ionización-válvula multiport –filtro (por la parte superior)-salida filtro-válvula multiport, luz UV y finalmente cloración. En la figura 29, la tubería se representa por la línea en color azul. Esta es la línea que más se va a utilizar, pues es la línea del proceso. La posición de la válvula multiport está en la posición “FILTER”. La secuencia de procesos se encuentra numerados en la siguiente figura.

Figura 29. Proceso de la planta



2. La segunda línea que se va a utilizar es para el proceso de retrolavado que es necesario ejecutarlo cada cierto período de tiempo. El proceso de retrolavado se muestra en la figura 30 y se representa por la línea roja. El agua entra por la normal como si fuera a hacer el proceso de tratamiento pero esta vez el agua entra al filtro por la parte inferior y sale por la superior, entra a la válvula multiport y está la manda por la línea roja de retrolavado. La secuencia de este proceso se indica mediante la numeración.

Figura 30. Proceso de retrolavado



8.3 SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA TUBERÍA

En esta sección se abordará el tema de los parámetros de la tubería, se hablará un poco de la norma RDE para tuberías de PVC

8.3.1 Norma RDE para tuberías de PVC. Es una norma basada en la relación del diámetro del tubo y el espesor de la pared. En esta norma, la presión de trabajo es constante e independiente del diámetro de la misma.³⁹ La fórmula está basada en las normas ISO:

$$\frac{25}{P} = \frac{D}{t} - 1$$

Ec. 33

³⁹ Manual Técnico Turbosistemas de Presión PVC

El diámetro de la tubería se seleccionó por el diámetro de la válvula multiport, la cual se encarga del dominio de todo el sistema hidráulico que es de 1 ½” RDE 21, además con este diámetro garantizamos unas pérdidas pequeñas de presión y un costo moderado también.

En la figura 31 se muestran las características de la tubería seleccionada como son sus diámetros exterior e interior. La línea subrayada con rojo indica la tubería que se seleccionó.

Figura 31. Diámetros de tubería

RDE 21 PVC
Presión de Trabajo a 23°C: 200 PSI

26	3/4	2900237	189	26.7	1.05	1.52	0.06	23.63
33	1	2900220	252	33.4	1.31	1.60	0.06	30.20
42	1 1/4	2900225	395	42.2	1.66	2.01	0.08	38.14
48	1 1/2	2902450	514	48.3	1.90	2.29	0.09	43.68
60	2	2902453	811	60.3	2.37	2.87	0.11	54.58
73	2 1/2	2900230	1185	73.0	2.87	3.48	0.14	66.07
88	3	2900233	1761	88.9	3.50	4.24	0.17	80.42
114	4	2900240	2904	114.3	4.50	5.44	0.21	103.42
168	6	2904616	5835	168.3	6.62	8.03	0.32	152.22

Fuente: PAVCO Colombia

En la tabla 17 se muestra con mayor claridad las características del tubo con su diámetro nominal, peso, diámetro exterior promedio, espesor y diámetro interior promedio.

Tabla 17. Características de la tubería

Diámetro nominal		Peso	Diámetro ext. promedio		Espesor pared		Diámetro interior promedio
mm	in	g/m	mm	in	mm	in	mm
48	1 1/2	514	48,5	1,90	2,29	0,09	41,2

Fuente: PAVCO

8.3.2 Codos, tes, adaptadores machos. Los codos, Tes y adaptadores son de 1 1/2 “.

8.4 PÉRDIDAS DE TUBERÍAS

Con el caudal de diseño y el diámetro de las tuberías se calculan la velocidad promedio en los tubos de la siguiente forma:

$$Q = v \cdot A$$

Donde el área es el área de una sección circular:

$$A = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$$

Por consiguiente:

$$v = 0,1042 \text{ [m/s]}$$

Las condiciones del agua son las siguientes

$$T = 20^\circ\text{[C]} \quad P: 100 \text{ [kPa]}$$

Con esto calculamos sus propiedades en el programa EES

$$\rho = 998,2 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu = 0,001002 \text{ [kg/m} \cdot \text{s]} \text{ (Viscosidad dinámica)}$$

$$\nu = 0,000001004 \text{ [m}^2\text{/s]} \text{ (Viscosidad cinemática)}$$

Con los datos anteriores se puede calcular el número de Reynolds, el cual viene dado por la ecuación 28

$$N_R = v \cdot d \cdot \frac{\rho}{\mu}$$

$N_R = 4276$ (*adimensional*) , este valor indica que el flujo se encuentra en estado turbulento.

Con estos datos se puede establecer el coeficiente de fricción dentro de la tubería

$$f = \frac{0,25}{\log^2 \left[\frac{1}{3,7 \cdot \frac{d}{\varepsilon}} + \frac{5,74}{N_R^{0,9}} \right]}$$

Donde la rugosidad ε para una tubería de PVC es de $1,5E-6$ [m]

Con esto se calcula el coeficiente de fricción para las tuberías, el cual da un resultado de:

$$f = 0,03976 \text{ (adimensional)}$$

Con esto se calcula las pérdidas de tubería de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s]}$$

Se va a hacer primero un análisis para el proceso de filtrado y luego para el proceso de retrolavado.

8.4.1 Pérdidas proceso de filtración. Para calcular las pérdidas por tuberías (sin contar accesorios) se suma la longitud total del sistema de filtrado y se calcula con la ecuación 29. Se hace de esta forma porque el tamaño de tubería y el flujo permanecen constantes.

La longitud total en el proceso de filtración es de:

$$L = 7,154 \text{ [m]}$$

De aquí las pérdidas totales por tuberías son:

$$h_L = 0,003819 [N * m/N]$$

Ahora se determinarán las pérdidas por los accesorios. Existe una pérdida a la entrada del filtro

PÉRDIDAS EN LA SALIDA (ENTRADA AL FILTRO)

Estas pérdidas pueden ser calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$h_{LS} = 1,0 * \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{Ec. 34}$$

$$h_{LS} = 0,0005532 [N * m/N]$$

PÉRDIDAS EN LA ENTRADA

Se calculan mediante la ecuación 35

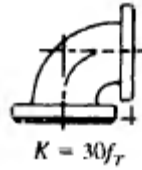
$$h_{Le} = 0,5 * \frac{v^2}{2 * g} \quad \text{Ec. 35}$$

$$h_{Le} = 0,0002766 [N * m/N]$$

PÉRDIDAS EN CODOS

De la literatura se encuentra para codos de 90°:

Figura 32. Pérdidas en codos



Fuente: Mecánica de Fluidos Robert L. Montt.

Donde f es el factor de fricción previamente calculado, entonces las pérdidas en los codos (13) serían iguales a:

Ec. 36

$$K_{\text{codo}} = 30 \cdot f$$

$$h_{\text{lodo}} = 0,008577 \text{ [N} \cdot \text{m/N]}$$

Ahora, a estas pérdidas se le sumarán las pérdidas que se calcularon en el capítulo 7 para el filtro en estado limpio, es decir, recién retrolavado y se obtendrán las pérdidas totales para el proceso de filtración. En la tabla 18 se muestran los resultados.

$$h_{\text{totales}} = h_l + h_{\text{acces}} + h_{\text{filtro}} \quad \text{Ec. 37}$$

Tabla 18. Pérdidas totales en el proceso de filtración

PÁRAMETRO	SÍMBOLO	VALOR[N*m/N]
Pérdidas en tuberías	h_l	0,003819
Pérdidas en accesorios	h_{acces}	0,008577
Pérdidas en filtro	h_{filtro}	0,02791
Pérdidas totales	h_{totales}	0,040306

Este es el cálculo aproximado para pérdidas recién hecho el retrolavado, sin embargo, no va a ser la máxima pérdida de presión encontrada en el sistema

puesto que el filtro se va ensuciando a medida que las partículas filtradas se estancan en el lecho filtrante. Es criterio de cada diseñador limitar las máximas pérdidas admisibles en el lecho filtrante. Para el caso en particular se tomará como pérdida máxima de 1 m. Entonces las pérdidas máximas serán las pérdidas calculadas anteriormente más el metro de pérdida. Se tiene así que la pérdida de presión máxima es de 1,04036 m.

8.4.2 Pérdidas proceso retrolavado. Se calcularán las pérdidas durante el proceso de retrolavado, es decir, cuando se está limpiando el filtro de las impurezas acumuladas durante el proceso de filtración. Al igual que se hizo en la sección anterior se calcularán las pérdidas en las líneas de tuberías y accesorios. Al final se le sumarán las pérdidas calculadas en el capítulo 7 para el proceso de retrolavado y así obtener las pérdidas totales.

La longitud de tubería para el retrolavado es mucho menor e igual a 4,317 m. De ahí:

$$h_l = 0,002304 [N * m/N]$$

Analizando los diferentes tipos de accesorios que se encuentran en esa línea se encuentra que

$$h_{acces} = 0,06522 [N * m/N]$$

Tabla 19. Pérdidas proceso de retrolavado

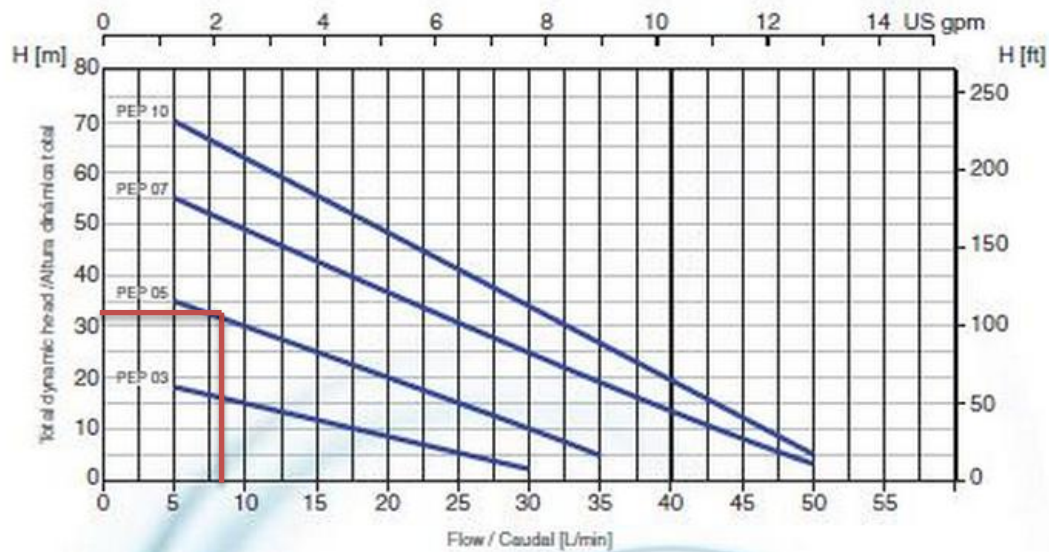
PÁRAMETRO	SÍMBOLO	VALOR [N*m/N]
Pérdidas en tuberías	h_l	0,002304
Pérdidas en accesorios	h_{acces}	0,006522
Pérdidas en filtro	h_{filtro}	0,19192
Pérdidas totales	$h_{totales}$	0,200746

Del proceso de retrolavado se puede concluir que presenta un valor alto de tuberías, esto se debe a que la bomba debe vencer las partículas suspendidas en el filtro lo que genera una gran caída de presión.

8.5 SELECCIÓN DE LA BOMBA

Se seleccionó una bomba Pearl de referencia PEP 05 A16S. El parámetro que se utilizó para seleccionar fue el caudal que tenemos que es de 500 [l/h] lo que equivale a 8,333[l/min]. Esta fue la bomba más pequeña que se encontró a nivel local y maneja caudales que van desde los 5 hasta los 35 [l/min], en la figura 33 se muestra la curva de desempeño de esta bomba.

Figura 33. Desempeño de la bomba



Fuente: Manual de fabricante

Como se puede detallar en la figura 33, para el caudal que se necesita (8,33 l/min) la bomba puede soportar una altura de aproximadamente 30 m, la cual es suficiente para vencer las pérdidas que se tienen en el sistema hidráulico. De la gráfica se deduce que la mejor bomba que se adaptaba al sistema que se tiene hubiera sido la PEP03, sin embargo no se consiguió a nivel regional así que se optó por la segunda más pequeña, es decir, la PEP 05.

9. DESINFECCIÓN DEL AGUA

Continuando con el proceso y habiendo hecho un paréntesis en el capítulo 9, se prosigue con el tratamiento en la planta. La desinfección es quizás el más importante de los procesos en la potabilización del agua, esto porque de él depende la calidad microbiológica de ella, y con ello la salud de quienes la consumen. La desinfección puede realizarse por medios físicos y químicos. Este proyecto busca implementar ambos tipos de desinfección. Después que el agua sale clarificada del filtro, ésta se expone a un proceso de radiación ultravioleta con el cual se busca eliminar microorganismos nocivos para la salud de las personas. Para asegurar que el agua presente una mejor calidad microbiológica y por normatividad colombiana, después del tratamiento físico con la luz UV se realiza el proceso químico de la cloración, con el cual se garantiza la eliminación de la mayoría de virus, bacterias y en general microorganismos que puedan alterar la salud de los consumidores. En este capítulo se decidió primero hablar de la cloración y luego de la desinfección por luz ultravioleta por lo masivo e importante que ha sido este proceso, aunque en el tratamiento real de la planta se utilice primero la luz UV.

9.1 DEFINICIÓN

La desinfección es el proceso mediante el cual un agente desinfectante se pone en contacto con el agua para ser tratada. También, puede definirse como aquellos procesos en los cuales microorganismos patógenos son destruidos. El propósito

primario de la desinfección del agua es el de impedir la diseminación de enfermedades hídricas.⁴⁰

Existen varios métodos para desinfectar el agua, el más popular sin lugar a dudas, la cloración que puede ser aplicada de diversas formas como el cloro gaseoso, hipocloritos de calcio y de sodio, ozono y luz Ultravioleta.

9.2 TEORÍA DE LA DESINFECCIÓN

La ley de Chick define la tasa de mortalidad de los microorganismos y se define mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = -KN \quad \text{Ec. 38}$$

Donde N es el número de microorganismos viables, t es el tiempo de contacto y K es la constante de velocidad de reacción de los microorganismos que depende del desinfectante utilizado. Esta ley establece que la tasa en la que disminuye los microorganismos es proporcional a la cantidad de ellos.

Integrando la ecuación se obtiene:

$$\int_{N_o}^{N_f} \frac{dN}{N} = -K \int_{t_o=0}^{t_f} dt \quad \text{Ec. 39}$$

$$\ln \frac{N_f}{N_o} = -Kt_f \quad \text{Ec. 40}$$

⁴⁰ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIQUIMICA. 1 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996. 226p.

Utilizando logaritmo en base 10 se obtiene:

$$\log \frac{N_f}{N_o} = -kt_f \quad \text{Ec. 41}$$

Dónde:

N_o = es el número inicial de microorganismos

N_f el final de microorganismos

k = es una constante y es equivalente a $k = 0,4343K$

Reorganizando la ecuación y despejando a t se obtiene la ecuación 42

$$t = \frac{1}{k} * \log \frac{N_o}{N_f} \quad \text{Ec. 42}$$

9.3 CLORACIÓN

La cloración es el método más común para desinfectar el agua, su bajo costo y efectividad le han dado esa popularidad. La cloración se utilizada para destruir principalmente a microorganismos que puedan afectar la salud de los seres humanos, sin embargo también puede ser utilizada para remover hierro y manganeso.

La desinfección por cloro cumple la siguiente ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = -KNt \quad \text{Ec. 43}$$

Integrando

$$\int_{N_o}^{N_f} \frac{dN}{N} = \int_{t_o=0}^{t_f} -Kt dt \quad \text{Ec. 44}$$

$$\ln \frac{N_f}{N_o} = -\frac{Kt_f^2}{2} \quad \text{Ec. 45}$$

Cambiando a base 10 y reorganizando,

$$t_f^2 = \frac{2}{k} * \log \frac{N_o}{N_f} \quad \text{Ec. 46}$$

Donde $k=1,6E-2$ para residuales de cloro libre y $k=1,6e-5$ para cloro combinado.

9.4 CLORO DISPONIBLE EN EL MERCADO

En el mercado se encuentran en diferentes estados el cloro. Es así que se encuentra en estado gaseoso, líquido o sólido dependiendo del uso y aplicación que se vaya a utilizar.

9.4.1 Cloro gaseoso. Se encuentra gaseoso en condiciones normales de temperatura, es una molécula diatómica de fórmula molecular Cl_2 . Se caracteriza por ser un gas tóxico de color amarillo-verdoso más denso que el agua. Sus aplicaciones en agua potable se relacionan con plantas de tratamiento de grandes proporciones.

9.4.2 Hipoclorito de sodio. Es una sal que tiene fórmula molecular $NaClO$, se encuentra en estado líquido. Es el más utilizado de los dos tipos de hipocloritos que se utilizan en el tratamiento de agua.

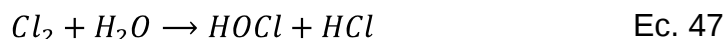
9.4.3 Hipoclorito de calcio. Al igual que el anterior, el hipoclorito de sodio es una sal de fórmula molecular $Ca(OCl)_2$. Su encuentra en estado sólido en polvos o pastillas. Por lo general se utilizan para aplicaciones de pequeñas plantas de tratamiento de agua y en piscinas. Es la forma de cloro que se va a utilizar en la planta para la planta que se va a diseñar.

9.5 REACCIONES QUÍMICAS DURANTE LA CLORACIÓN

En esta sección se muestran las reacciones que se dan lugar cuando se utiliza el cloro gaseoso, el hipoclorito de sodio y calcio.

9.5.1 Cloro libre disponible. El término cloro libre hace referencia al cloro disuelto en el agua que no ha reaccionado con la materia orgánica. Como se mencionó anteriormente existen varios compuestos que se le pueden suministrar al agua para clorarla.

Para el cloro gaseoso ocurre la siguiente reacción:



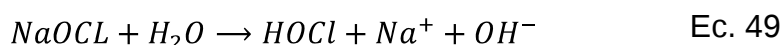
En la reacción se forman ácido hipocloroso (HOCl) y clorhídrico (HCl), el primero rápidamente se ioniza y se forman los iones hipoclorito e hidrógeno.



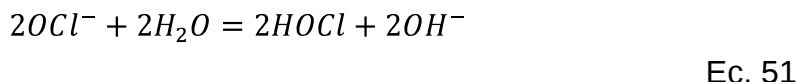
La disociación del $HOCl$ depende de la concentración del ión hidrógeno, es decir, del pH. A pH's menores a 6 el residual es mayoritariamente $HOCl$. En pH's neutros los residuales de $HOCl$ y OCl^- son parejos, y a pH's superiores a los 9 el residual es predominantemente OCl^-

A la suma de $HOCl$ y OCl^- es lo que se le conoce como cloro libre residual o residual de cloro libre.

Para el hipoclorito de sodio ocurre lo siguiente:

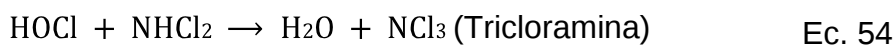
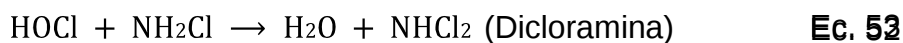
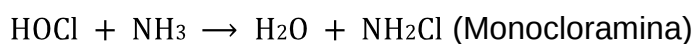


Y por último, el hipoclorito de calcio al tener contacto con el agua reacciona de la siguiente forma:



Como se ve en la última reacción el ion hipoclorito se forma de una vez, mientras que para las dos primeras reacciones se forma primero el ion hipocloroso $HOCl$ y luego si se ioniza y se produce el OCl^- . Ambos (OCl^- y $HOCl$) tienen potencial de desinfección, sin embargo, el $HOCl$ tiene un poder de desinfección más rápido y por tanto es un mejor desinfectante. El contenido de $HOCl$ y OCl^- en el agua es lo que se conoce como cloro libre disponible

9.5.2 Cloro combinado. Cuando el $HOCl$ reacciona con el amoníaco que se encuentra en el agua se genera una especie de compuestos llamados cloraminas.



La suma de la monocloramina, dicloramina y tricloramina es lo que se conoce como cloro combinado. También se le suele llamar como residual de cloro combinado. La suma del cloro libre y el cloro combinado se conoce como cantidad de cloro total. En resumen, en la tabla 20 se muestran:

Tabla 20. Cloro libre, combinado y total

Clasificación	Compuestos
Cloro libre	HOCl + OCl ⁻
Cloro combinado	NH ₂ Cl + NHCl ₂ + NCl ₃
Cloro total	Cloro libre+ cloro combinado

La conversión de remociones porcentuales en términos de unidades log es muy sencilla; las unidades log corresponden al número de nueves de la remoción porcentual.⁴¹ La fórmula que permite realizar este cálculo se expresa a continuación:

$$U_{loga} = \log \frac{1}{1-Rem_f} \quad \text{Ec. 55}$$

$$Rem_f = 1 - \frac{1}{10^x} \quad \text{Ec. 56}$$

Dónde:

U_{loga} , son las unidades log de remoción

Rem_f , es la remoción fraccional.

⁴¹ ROMERO, Jairo Alberto. ACUIQUIMICA. 1 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996. 226p.

Por ejemplo, si se desea tener un porcentaje de remoción del 99,99 %

$$X = \log \frac{1}{1 - 0,9999} = 4 \log$$

9.6 SELECCIÓN DEL TIPO DE CLORO A UTILIZAR EN LA PLANTA

Se debe seleccionar cuál tipo de forma de cloro se va a utilizar. Para esta planta se utilizará hipoclorito de calcio $Ca(OCl)_2$ como fuente de cloro al 91% por las siguientes razones:

- ✓ Es el tipo más utilizado para aplicaciones pequeñas como plantas portátiles de poca capacidad, para aplicaciones macro, llámese plantas municipales el desinfectante que más se utiliza por su costo, es el cloro gaseoso. Este también puede ser peligroso y tóxico.
- ✓ En base a lo anterior se buscó en el mercado y se encontró unos dosificadores que funcionan con pastillas de cloro.

9.7 DOSIFICACIÓN

Al igual que con el sulfato de aluminio, en la realidad no existe un manual que indique las dosis exactas que se requieren para determinar la cantidad de cloro a utilizar, pues esto depende de la fuente de agua de abastecimiento. Para el hipoclorito de calcio se recomiendan unas dosis que fluctúan de los 0,5-5 mg/L. Por lo general, el producto químico disponible en el comercio viene a concentraciones que varían desde el 30 hasta el 90 por ciento de cloro disponible

en peso, el resto se considera material inerte. Entre mayor concentración de cloro se tenga menos cantidad del producto se necesitará. Para esta planta se seleccionó hipoclorito de calcio al 91% con una dosis de 2 mg/L. Se debe tener en cuenta que la dosis máxima de cloro de consumo en seres humanos es de 50 mg/L. Así, con el caudal que se está diseñando (500 l/h) y con la cantidad y concentración de cloro, se calcula la dosis en mg que requiere este sistema:

$$mg_{CaOCl_2} = Q * \frac{D}{C} \quad \text{Ec. 57}$$

$$500 \frac{l}{h} * \frac{2}{0,91} \frac{mg}{L} = [\frac{1098,9mg}{h}]$$

Donde

mg_{CaOCl_2} son los miligramos de hipoclorito de calcio [mg]

Q , es el caudal de la planta en $[\frac{l}{h}]$

D , es la dosis en mg/L

C , la concentración (adimensional)

Manteniendo esta dosis constante, se estima que en alrededor de 10 horas de funcionamiento se estará gastando un kilogramo del producto (hipoclorito de cloro en tabletas)

Ahora, se desea conocer el tiempo de contacto necesario para eliminar el 99,9 % de las bacterias. De la ecuación 46 propuesta por Chick:

$$t_f^2 = \frac{2}{k} * \log \frac{N_o}{N_f}$$

Se quiere dejar un residual de cloro combinado de 2 mg/L, con $k=1,6e-5$

$$N_t = 1 - 0,999 N_o = 1E - 3N_o$$

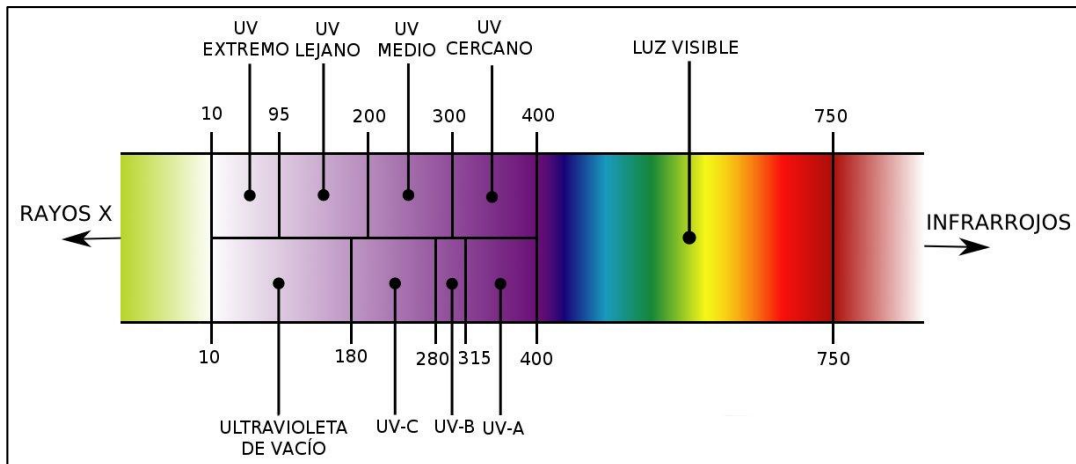
$$t_f = 612,37 [s]$$

Es un tiempo superior a los 10 min.

9.8 NATURALEZA DE LA LUZ ULTRAVIOLETA (UV)⁴²

La luz UV se encuentra en la región del espectro electromagnético limitada entre los rayos X y la luz visible. En la figura 34 se puede apreciar el espectro electromagnético de la luz.

Figura 34. Espectro electromagnético



Fuente: Tipos de radiación ultravioleta. Disponible en: <http://uvcpblog.wordpress.com/2008/11/04/tipos-de-radiacion-ultravioleta/>

⁴² EPA (United States Environmental Protection Agency) ULTRAVIOLET DISINFECTION GUIDANCE MANUAL FOR THE FINAL LONG TERM 2 ENHANCED SURFACE WATER TREATMENT RULE, 2006. 436p

De acuerdo a la clasificación dada por Meulemans en el año de 1986, el espectro UV se encuentra dividido en 4 secciones:

- ✓ UV Vacío, comprende unas longitudes de onda que se encuentran entre los 100 y 200 nm.
- ✓ UV-C (200-280 nm)
- ✓ UV-B (280-315 nm)
- ✓ UV-A (315-400 nm)

De la anterior clasificación se sabe que el mayor efecto germicida se encuentra en la radiación UV del tipo B y C. El tipo A puede tener un buen efecto germicida, pero es un tipo de radiación relativamente débil y se necesitaría mayores tiempos de exposición para lograr la desinfección. El UV de vacío es impráctico debido a que se disipa rápidamente en el agua en cortas distancias (Munakata et al. 1991). En este proyecto de grado se trabajará con radiación del tipo UV-C de manera artificial por medio de lámparas de mercurio a una longitud de onda de 254 nm.

Por lo general, la luz UV es generada aplicando un voltaje a través de una mezcla de gas lo que ocasiona una descarga de fotones. Las longitudes de ondas emitidas dependerán de la composición elemental del gas y de la potencia de la lámpara. Casi todas las lámparas que se diseñan en la actualidad utilizan una mezcla de gas que contiene vapor de mercurio. El vapor de mercurio presenta ventajas para la desinfección UV ya que genera luz en el rango germicida.

La emisión de luz UV desde la lámpara de mercurio depende de la concentración de los átomos de mercurio, lo cual está directamente relacionado a la presión de vapor de mercurio. Existen dos tipos de lámparas de mercurio en el mercado:

- ✓ Lámparas de mercurio de baja presión (cerca al vacío 2×10^{-5} a 2×10^{-3} psi) y moderada temperatura (40°C) produce radiación a longitud de onda monocromática, es decir, a una determinada longitud de onda, para este caso 253,7 nm.
- ✓ Lámparas de mercurio de presión media, tienen más altas presiones de vapor, entre los 2 y 200 psi y más altas temperaturas de trabajo (600-900 °C), es utilizada para incrementar la frecuencia de las colisiones entre los átomos de mercurio, lo que genera luz UV policromática, es decir, a diferentes longitudes de onda.

9.9 LUZ UV, GENERACIÓN Y TRANSMISIÓN⁴³

El uso de la luz UV para desinfectar agua involucra los siguientes procesos:

1. Generar luz UV con las propiedades germicidas deseadas
2. Entregar o transmitir la luz hacia los microorganismos patógenos.

En la siguiente sección se resume cómo la luz UV es generada y qué ocasiona que su efectividad disminuya.

9.10 PROPAGACIÓN DE LA LUZ UV

Cuando la radiación UV se propaga desde su fuente, ésta interactúa con el medio que la rodea, es así que esta puede ser: absorbida, reflejada, refractada y dispersada.

⁴³ EPA (United States Environmental Protection Agency) Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule, 2006. 436p

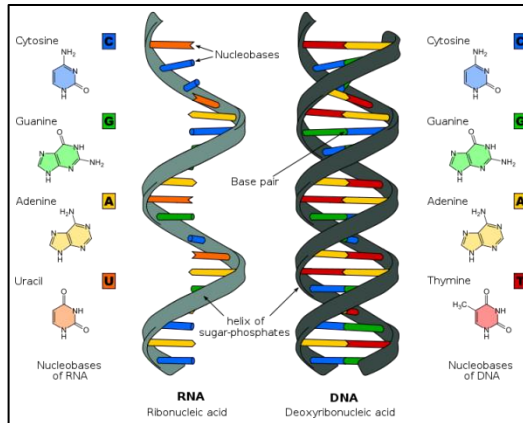
- ✓ Absorción: es la transformación de luz a otras formas de energía cuando ésta pasa a través de una sustancia
- ✓ Refracción: es el cambio de dirección en la propagación de la luz cuando pasa de un medio a otro, donde la velocidad de propagación es diferente
- ✓ Reflexión: es el cambio en la dirección de la propagación de la luz cuando es deflectada por una superficie.
- ✓ Dispersión: es el cambio en la dirección de la propagación de la luz causado por la interacción con una partícula.

9.11 INACTIVACIÓN MICROBIANA POR LUZ UV⁴⁴

Los ácidos nucleicos son los responsables de definir las funciones reproductivas y metabólicas en los seres vivos. En ellos se encuentra la información genética de los organismos. Existen dos formas básicas de ácidos nucleicos: el ADN (ácido desoxirribonucleico) y el ARN (ácido ribonucleico). El primero es responsable de transmitir la información hereditaria, es decir, se encarga de almacenar la información genética. El ARN es el encargado de sintetizar las proteínas (producción) que son necesarias para las actividades y desarrollo de las células. Su principal diferencia estructural es que el ADN agrupa las proteínas en forma de hélices pero en pares, es decir, es una cadena doble, mientras el ARN presenta una cadena sencilla. En la figura 35 se puede observar un esquema de los ácidos nucleicos (ADN y ARN).

⁴⁴ Ibid

Figura 35. ADN y ARN



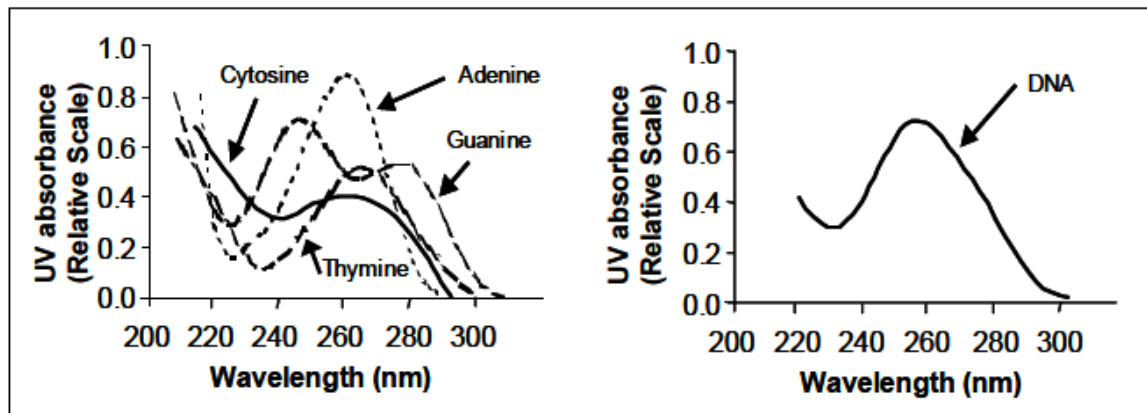
Fuente: La vida extraterrestre puede no estar basada en el ADN o ARN. Disponible en: <http://bitnavegante.blogspot.com/2012/04/la-vida-extraterrestre-puede-no-estar.html>

Desde un punto de vista químico el ADN y el ARN son polímeros de nucleótidos. Los nucleótidos son moléculas compuestas por una pentosa, una base nitrogenada y un grupo fosfato.

Las bases nitrogenadas son compuestos formados por dos o más átomos de hidrógeno. En el ADN Y ARN comparten las mismas bases nitrogenadas del tipo purinas (adenina y guanina), pero no con las de tipo pirimidina ya que en el primero estas son timina y citosina, mientras que para el segundo son uracilo y citosina.

Como se observa en la figura 36, las bases nitrogenadas absorben la luz UV en longitudes de onda entre 200 y 300 nm, teniendo un máximo a 260 nm y un mínimo de 230 nm aproximadamente.

Figura 36. Absorbancia UV de las bases nitrogenadas



Fuente: Manual EPA UV, adaptada de Jagger.

De acuerdo a lo dicho por Jagger en 1967, tanto las purinas como las pirimidinas absorben la luz UV, sin embargo las que presentan un mayor daño a la radiación UV son estas últimas.

Los tres tipos de daño que permiten la inactivación de la luz UV son:

- ✓ Dímeros de las pirimidinas
- ✓ Pyrimidine (6-4) pyrimidone photoproducts
- ✓ Proteínas-ADN enlaces cruzados

De los anteriores, el daño en los dímeros de las pirimidinas es el más común de los daños 1000 veces por encima de cualquier otro tipo de daño (Adler 1966), un daño en los dímeros evita la replicación de los microorganismos (llámese virus, bacterias, protozoos, etc.). Sin embargo, este daño no evita que los microorganismos puedan seguir desempeñando otras funciones básicas como la respiración. Con lo anterior se debe dejar claro lo siguiente: con la dosis que se aplica se evita que los microorganismos se repliquen, más no se eliminan, para eliminarlos completamente o dañar completamente sus funciones metabólicas se

requieren dosis muy superiores de radiación UV y eso no es lo que en la práctica se desarrolla.

9.12 DEFINICIONES: INTENSIDAD UV, DÓSIS UV Y DISTRIBUCIÓN DE LA DOSIS UV⁴⁵

Es importante definir los términos intensidad UV, dosis UV y distribución de la dosis UV, a continuación se explicarán.

9.12.1 Intensidad UV. La intensidad de la luz UV en un punto determinado se define como la suma de la intensidad UV desde todas las direcciones, se expresa en unidades de W/m^2 .

9.12.2 Dosis UV. Es la cantidad de intensidad UV durante un período de tiempo determinado, de otra forma, es el área bajo la curva en un gráfico de intensidad contra tiempo, es decir su integral. Las unidades comúnmente utilizadas son: J/m^2 , $0mJ/cm^2$

Si la intensidad de la luz UV es constante, o si se toma un promedio en la intensidad de luz UV, la dosis UV se puede calcular mediante la siguiente expresión:

Ec. 58

$$UV_D = I * t$$

Donde I es la intensidad de luz UV y t es el tiempo de exposición a la radiación.

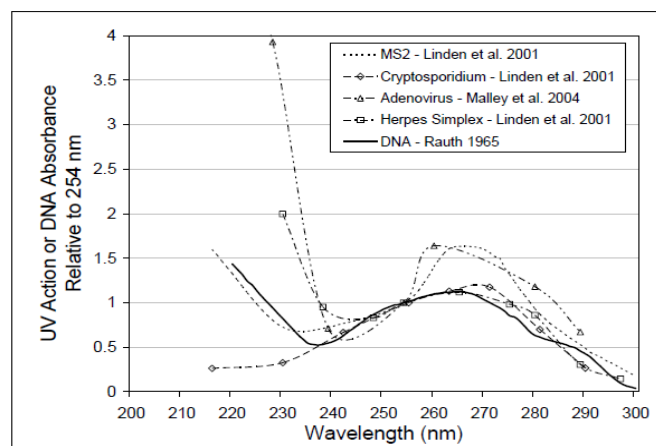
⁴⁵ Ibid

9.13 RESPUESTA DE LOS MICROORGANISMOS EN DIFERENTES LONGITUDES DE ONDA⁴⁶

La respuesta de los microorganismos varía de acuerdo a la longitud de onda que se le está aplicando al agua. El espectro de acción de un microorganismo se define como una medida de qué tan eficiente es la inactivación en función de la longitud de onda a la cual se es sometido el microorganismo.

En la figura 37 se ilustra el espectro de acción para cuatro microorganismos: Adenovirus, Cryptosporidium, MS2 virus y Herpes Simplex. Como se puede ver en la figura, la acción de la luz UV tiene un máximo cuando su valor es cercano a los 260 *nm*, tiene un mínimo local a 230 *nm* y su efecto es casi nulo a los 300 *nm*. Como no es viable económicamente producir luz UV a los 260 *nm*, pero sí a un valor cercano, esto con lámparas de mercurio que producen luz UV artificialmente a 254 *nm*.

Figura 37. Absorbancia de algunos microorganismos



Fuente: Manual EPA, Adaptado de Rauth(1965), Linden et al(2001), and Malley et al.(2004)

⁴⁶ Ibid

9.14 LÁMPARAS UV

Existen varias maneras de obtener luz UV de forma artificial, en el rango germicida. Las más comunes son las lámparas de mercurio de baja presión -baja intensidad, las lámparas de mercurio de baja presión y alto rendimiento y las lámparas de mercurio de presión media. Sin embargo, hay otras tecnologías que se han venido desarrollando como lo son las lámparas de xenón y LED's.

La principal diferencia entre una lámpara de mercurio de baja y media presión es que la primera suministra luz UV de tipo monocromático, es decir, a una determinada longitud de onda cercana a los 254 nm, mientras que la segunda lo hace de manera policromática, así emite luz UV en varias longitudes de onda dentro del espectro germicida, entre los 200 y 300 nm. El diseño de estas lámparas es muy similar a las de las bombillas fluorescentes

En la tabla 21 se muestra las principales características de los tipos de lámparas mencionadas anteriormente, y pues las que son de mayor uso.

Tabla 21. Comparación de tipos de lámparas germicidas

Parámetro	Unidad	Lámpara de baja presión	Lámpara de baja presión, alto rendimiento	Lámpara de presión media
Potencia de consumo	W	40-100	200-500	1000-10000
Corriente	ma	350-550	Variable	Variable
Voltaje	V	220	Variable	Variable
Eficiencia(salida/entrada)	%	30-40	25-35	10-15
Temperatura de operación	°C	35-45	60-100	600-900
Presión de vapor del Hg	kPa	0,00093	0,0018-0,10	40-4000
Longitud de lámpara	m	0,75-1,5	Variable	Variable
Diámetro de la lámpara	mm	15-20	Variable	Variable
Tiempo de vida de la lámpara	h	8000-10000	10000-12000	4000-8000

Parámetro	Unidad	Lámpara de baja presión	Lámpara de baja presión, alto rendimiento	Lámpara de presión media
Longitud de onda	<i>nm</i>	254, monocromática	254 monocromática	200-300 Policromática
Número de lámparas relativo	N/A	Alto	Intermedio	Bajo
Decrecimiento de salida de potencia en el tiempo de vida	%	20-25	25-30	20-25

Fuente: Adaptado de "Principle of water treatment " y "EPA UV manual guidance De la tabla anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

- ✓ Las lámparas de mercurio de baja presión emiten luz monocromática mientras que las de presión media emiten luz a diferentes longitudes de onda.
- ✓ Las temperaturas de operación son muy inferiores que las de presión media.
- ✓ Las lámparas de baja presión tienen mayor eficiencia de operación, superiores al 30% mientras que las de presión media son inferiores al 20%
- ✓ Con respecto a las lámparas de baja presión, las de media generan potencias mayores y por tanto se requieren un menor número de lámparas para una misma dosis.
- ✓ Las lámparas de mercurio de baja presión tienen más horas de vida con respecto a las de presión media, lo cual implican mayor cambio y aumento de costos.

Las lámparas de mercurio están conformadas por los siguientes elementos:

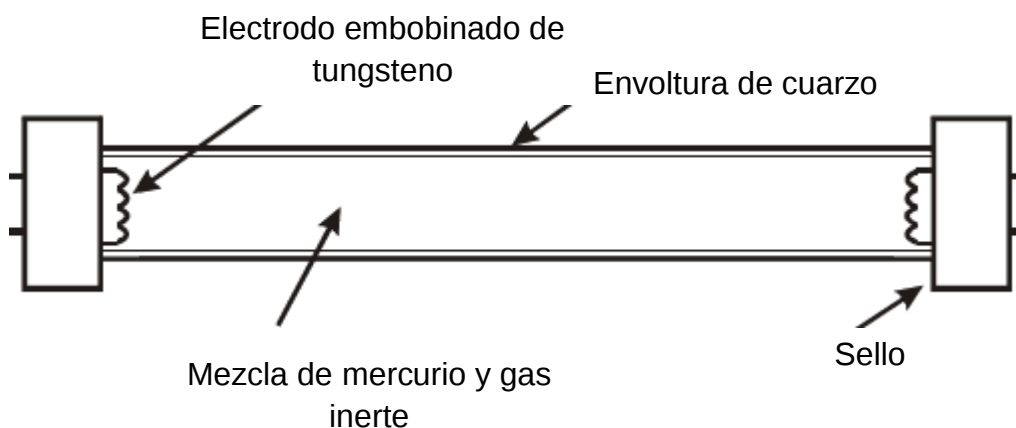
1. Envoltura de la lámpara: es la encargada de transmitir la luz UV, también sirve como aislante eléctrico. Son hechos de cuarzo o de sílice vítrea, se utiliza estos materiales por tener una alta transmitancia de luz UV y por ser capaces

de soportar elevadas temperaturas (para lámparas de mercurio depresión media) que alcanzan los cientos de grados. Son de espesor pequeño, entre 1 y 2 mm.

2. Los electrodos: se encarga de generar electrones que colisionan con los átomos del gas inerte, causando que el gas inerte se ionice. Se encarga de generar la transferencia de calor para que las lámparas puedan operar a una temperatura adecuada. Por lo general son elaborados de cable de bobina de tungsteno.
3. Relleno de mercurio: el relleno puede estar echo de mercurio en diferente estado: líquido, sólido o vapor.
4. Relleno de gas inerte: por lo general el gas inerte es argón.

La figura 38 muestra un diagrama típico de una lámpara UV germicida de baja presión. En él se observan las partes típicas por las cuales está formada.

Figura 38. Lámpara UV de mercurio de baja presión



Fuente: Modificado por el autor y tomado de Manual EPA

9.15 SELECCIÓN DE LA LÁMPARA PARA LA PLANTA

La lámpara de mercurio seleccionada presenta las siguientes características:

- ✓ Es efectiva y amigable con el medio ambiente ya que no utiliza químicos.
- ✓ Tiene bajo contenido de mercurio
- ✓ Largo tiempo de vida
- ✓ Longitud de onda dominante: 254 nm
- ✓ Eficiencia 32,6%

Se seleccionó una lámpara de mercurio de baja presión que irradia luz a 15 [W]. De estos 15 W sólo irradia 4,9 W en el rango germicida (200-280 nm) lo cual le da una eficiencia del 32,6%. Las características de la lámpara son las que se dan en la tabla 22.

Tabla 22. Características de la lámpara seleccionada

CARACTERÍSTICA	VALOR
Potencia nominal	15 W
Voltaje nominal	55 V
Corriente	0,33 A
Potencia radiada (240-280 nm)	4,9 W
Diámetro	0,026 m
Longitud	0,438 m

Fuente: Fabricante

Posteriormente, se calcula la dosis germicida mediante la ecuación 59:.

$$Pot_{ger} = \frac{Pot_{uvc}}{A_{elect}} \quad \text{Ec. 59}$$

Donde Pot_{uvc} es la potencia irradiada es igual a 4,9 W

A_{elect} es el área superficial de la lámpara y se calcula

$$A_{elect} = \pi \cdot d_{lamp} \cdot a_{elec} \quad \text{Ec. 60}$$

a_{elec} es la distancia entre los electrodos de la lámpara

$$A_{elect} = 283,6 \text{ cm}^2$$

$$Pot_{ger} = 17278 \mu W/cm^2$$

En la figura 39 se muestra las características de la lámpara germicida dada por el fabricante.

Figura 39. Selección de la lámpara UV



Product-reference	Product-number	W	V	A	UVC/W	l [mm]	d [mm]	a [mm]	λ [nm]	Starter	↑ [h]	↓ [h]
OSRAM PURITEC® HNS® low-pressure lamps												
HNS 4W G5	4008321378323	4	29	0,17	0,9	134	79	15,5	s180	G5	ST111	6.000 25
HNS 6W G5	4008321378347	6	42	0,16	1,7	210	154	15,5	s180	G5	ST111	8.000 25
HNS 8W G5	4008321378392	8	56	0,15	2,5	287	230	15,5	s180	G5	ST111	8.000 25
HNS 15W G13	4008321054227	15	55	0,3	4,9	436	354	25,5	s180	G13	ST111	8.000 20
HNS 25W G13	4008321054258	25	46	0,6	6,9	436	351	25,5	s180	G13	ST111	8.000 20
HNS 30W G13	4008321398895	30	96	0,36	13,4	893	808	25,5	s180	G13	ST111	8.000 10
HNS 55W G13	4008321054319	55	83	0,77	18	893	808	25,5	s180	G13	ST111	8.000 10

Operated with suitable control gear for fluorescent lamps, except for 1 with 13 W output. Other types are available on request.

*economical lifetime

Fuente: Catálogo de fabricante OSRAM

Con la dosis que se está suministrando se pueden eliminar el 99,9 % de los microorganismos mostrados en la tabla 23.

Tabla 23. Dosis UV necesaria para eliminar el 99,9% de los microorganismos

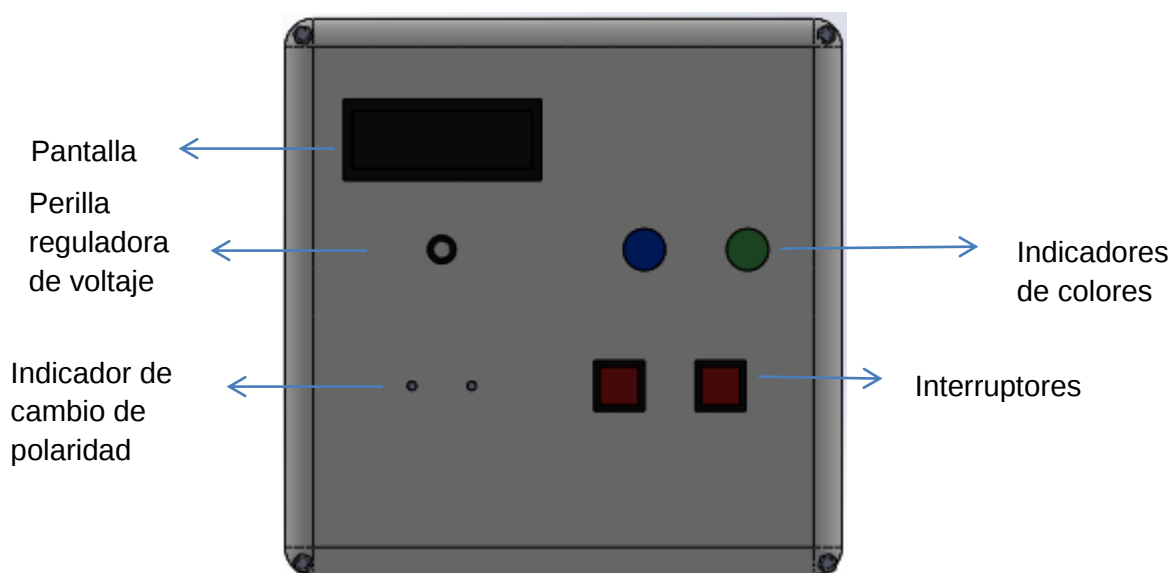
Bacterias/virus/quistes	Poder para matar $\mu W/cm^2$	Bacterias/virus/quistes	Poder para matar $\frac{\mu W^2}{cm}$
Bacillus anthracis	8700	Poliovirus (poliomielitis)	7000
Bacteriófago(E. Coli)	6500	Pseudomonas aeruginosa	3900
la levadura de Baker	8800	Salmonella(intoxicación alimentaria)	1000
Corynebacterium diphtheriae	6500	Salmonella parathypi (fiebre entérica)	6100
Bacilos disentería (diarrea)	4200	Salmonella typhosa (fiebre tifoidea)	7000
Escherichia coli (diarrea)	7000	Dysenteriae Shigella (disentería)	4200
Hepatitis	8000	Shigella flexneri (disentería)	3400
Influenza	6000	Staphylococcus epidermis	5800
Pneumophila Legionella	3800	Streptococcus faecalis	10000
Mycobacterium tuberculosis	10000	Commo Vibro (cólera)	6500

Fuente: Manual EPA

10. SISTEMA ELÉCTRICO Y DE CONTROL

El sistema de control deber ser económico, confiable, ergonómico y seguro, además de fácil manejo y automático. En la figura 40 se muestra el sistema de control de la planta.

Figura 40. Tablero de control



El sistema de control tiene varios elementos que permiten su fácil uso y manejo. Este sistema está conformado por dos interruptores los cuales permiten el paso de corriente eléctrica hacia el ionizador y la lámpara UV. Cada uno tiene sus respectivos indicadores de colores que avisarán de manera visual su correcto funcionamiento. Además este sistema cuenta con una pantalla LCD que muestra cuantitativamente el valor de voltaje suministrado hacia el ionizador, éste es controlado por medio de una perilla reguladora de voltaje que se encuentra

justamente debajo de dicha pantalla. Por último, el sistema cuenta con unos indicadores de colores que muestran el cambio de polaridad para el suministro de voltaje hacia el ionizador. Este cambia cada 30 s.

En la tabla 24 se muestran los elementos constitutivos del sistema y de control, se especifican y describen.

Tabla 24. Elementos del sistema eléctrico y de control

Elemento	Especificación	Descripción
Interruptor  Fuente: http://es.123rf.com/	10 A (dos)	Es un dispositivo que permite el paso o suspensión de corriente eléctrica
Indicadores de colores 	Dos	Este dispositivo es utilizado con el fin de tener un control visual durante el proceso. En el sistema se tienen dos indicadores Uno de color verde para la lámpara UV. Otro color azul para el ionizador.
LCD 	LCD 16x2 (Una)	Es un dispositivo electrónico muy utilizado, sirve para mostrar mensajes, parámetros, números.
Ventilador “cooler” 	1	Elemento que limita el sobrecalentamiento de los circuitos eléctricos.
Balasto electrónico	2X32 PTB (Uno)	Es un elemento que sirve para limitar y mantener estable la

Elemento	Especificación	Descripción
 Electrocontrol electronic ballast, model 3X32-2X17 P TB. It is a rectangular unit with a black casing and a white label. The label includes technical specifications: 120 V, 0.50 A - 5000 Hz, FACTOR DE POTENCIA 0.95, and No PCB's. It also features a diagram of a ballast circuit and the text 'LUMINACIÓN' and 'BALASTO ELECTRÓNICO'.		corriente que se dirige hacia la lámpara de mercurio
Variador de polaridad  A polarity inverter module, labeled 'P/N/E', used for changing the polarity of the electrodes. It is a small, rectangular, silver-colored component with several wires connected to it. The label also includes technical specifications: 120 V, 0.50 A - 5000 Hz, FACTOR DE POTENCIA 0.95, and No PCB's.	1	Cambia la polaridad de los electrodos a los que se les está aplicando el voltaje con el fin de la tasa de pérdida del electrodo sea constante para los dos

11. PRUEBAS Y PUESTA EN MARCHA

En este capítulo se mostrará el montaje y la puesta en marcha del proyecto, primero se mostrará cómo se prepara el filtro, el sistema hidráulico, la válvula multiport y los dosificadores. Este capítulo concluirá con los análisis de los resultados obtenidos después del tratamiento del agua, se presentarán gráficas, tablas y conclusiones.

11.1 PREPARACIÓN DE FILTRO

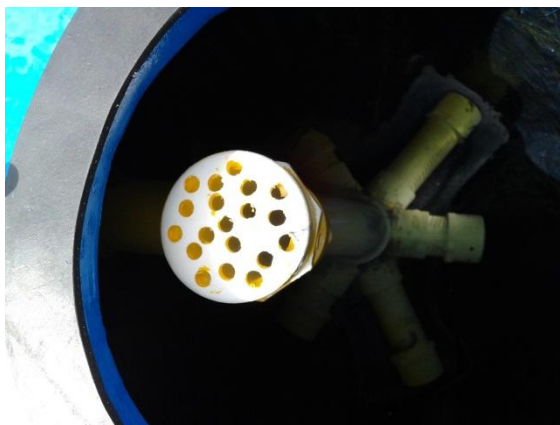
La sílice y la grava son depositadas en el filtro en el momento de su puesta en marcha, se hace así y no de otra forma debido al evidente peso que se anexaría a la planta y haría más difícil su desplazamiento. La planta, sin estos dos elementos no supera los 40 *kg* en masa lo cual la hace fácil de maniobrar, sin embargo, al anexarle el peso del lecho filtrante aumenta su masa significativamente (en casi 100 *kg*).

A continuación, se describen los pasos que se deben seguir al momento de instalar el filtro:

Como se explicó en el capítulo 7, la granulometría se deposita de manera descendente en tamaño de grano, es decir, primero se depositan las gravas y luego las arenas, el proceso se realiza de la siguiente manera:

1. Lo primero que se hace es retirar la tapa superior del filtro. Ver figura 41.

Figura 41. Proceso de llenado de filtro



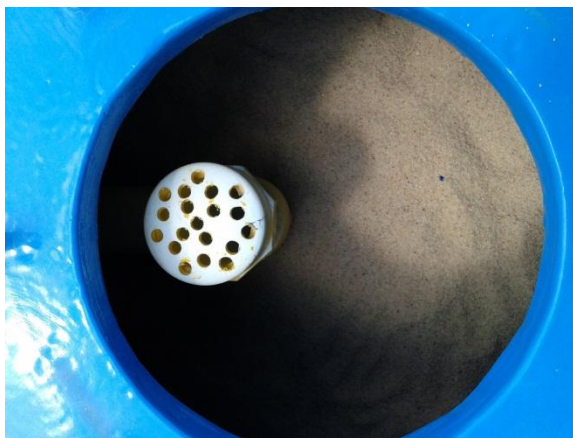
2. Se protege las tuberías con plástico para no afectarlas.
3. Luego se dispone a depositar los bultos de grava del tamaño $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{8}$ de *in* y se mira que sea se encuentre bien esparcida por todo el filtro. Ver figura 42.

Figura 42. Introducción de grava



4. Se procede a cargar el bulto de sílice No 20-30, se esparce bien.
5. Se continúa agregando el bulto de arena (sílice) No 20-40(el de menor granulometría). Ver figura 43.

Figura 43. Introducción de arena



6. Se retira el plástico que se puso en el paso 2.
7. Se hace aseo sobre la tapa, limpiando los restos de arena y grava que pudieron quedar al momento de depositarlos en el filtro y se le aplica silicona a la parte superior del empaque.
8. Para finalizar se sella el filtro con sus tuerca y arandelas, se ajustan muy bien. Ver figura 44.

Figura 44. Sellado de filtro



11.2 INSTALACIÓN DEL SISTEMA HIDRÁULICO

La instalación hidráulica se instala de la siguiente manera:

1. Se conecta la bomba centrífuga a la entrada de la planta, la entrada se identifica con la entrada del dosificador de floculante. Ver figura 45.

Figura 45. Instalación del sistema hidráulico



2. La salida de agua se conecta a la tubería que la lleva a su almacenamiento, tratar de que esta distancia sea lo más corta posible para que no se requiera una bomba de mayor capacidad.
3. De la salida de agua de purga se lleva una tubería hasta el sitio donde se está captando el agua para no desperdiciar nada de este líquido.
4. Para iniciar por primera vez la planta se debe verificar que permanezca abierta la válvula de alivio que se encuentra en la parte superior de la tapa del filtro y debe ser cerrada al momento que empiece a salir agua sobre ella y no se debe volver a abrir.

5. Manejo de la válvula multiport se mostrará en la sección que viene a continuación.

11.3 MANEJO DE LA VÁLVULA MULTIPORT

La válvula multiport es sin duda una de las partes más importantes en la planta portátil de tratamiento de agua, como se había dicho anteriormente su función principal es la de limpiar el filtro cuando este se encuentra bastante obstruido debido a las partículas en suspensión y sólidos que se encuentran en el agua. El siguiente procedimiento describe cómo se debe utilizar la válvula multiport cuando se requiere asear el filtro:

1. Primero se debe verificar que el sistema no se encuentre funcionando, para ello se debe o apagar la bomba o cortar el flujo del agua hacia el sistema, luego se gira la perilla de la válvula multiport que inicialmente se encuentra en la posición “FILTER” y se traslada a la posición “WASTE” (en sentido de las manecillas del reloj). En la figura 46 se muestra este proceso.

Figura 46. Válvula multiport modo filtro



2. Una vez hecho el paso anterior se procede a encender nuevamente la bomba o en su defecto se permite el acceso del agua al sistema. En este proceso el agua enjuaga el lecho filtrante realizando un proceso de recirculado dentro del tanque. Este proceso debe durar alrededor de 30 segundos. En la figura 47 se muestra el procedimiento.

Figura 47. Válvula multiport hacia retrolavado



3. Una vez transcurridos los 30 segundos, se vuelve a apagar la bomba y se lleva la perilla de la posición "WASTE" a la posición "BACKWASH", se enciende nuevamente la bomba y así comienza el proceso de purga del agua del enjuague del filtro, este procedimiento dura alrededor de 25 segundos.
4. Cuando empieza a salir agua clarificada por la manguera de purga se apaga la bomba y se lleva la perilla de la posición "BACKWASH" a la posición "FILTER"

La frecuencia de este proceso depende en gran medida de la calidad el agua que se está utilizando para ser tratada, es evidente, que entre el agua sea más turbia , más se va a tapar el filtro y más procesos de lavado se requerirán, sin embargo,

realizarlo diariamente sería una gran forma de mantener el filtro en óptimas condiciones.

11.4 PRUEBAS

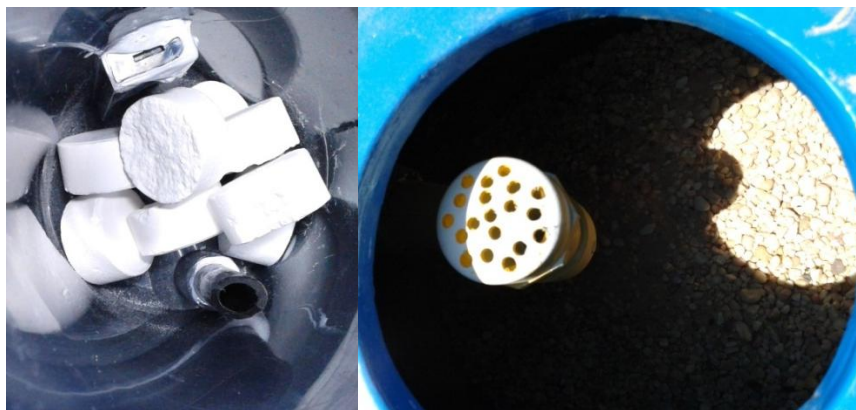
Al igual que se hizo al comienzo del proyecto se realizaron una serie de análisis físico, químico y bacteriológico después de la puesta en marcha e instalación, para comprobar que el prototipo esté funcionando correctamente. Se muestran los valores promedio en la tabla 25 y 26. La puesta en marcha se puede ver en la figura 48.

Figura 48. Puesta en marcha



Se llena el filtro con la sílice y la grava, cerrada, una vez sellado y sin ninguna fuga de agua observable se procedió a llenar los dosificadores de sulfato de aluminio e hipoclorito de calcio en pastillas como lo indica las figuras 49 y 50.

Figura 49. Llenado de pastillas de cloro y del filtro



Fuente: Autor

Figura 50. Adición de coagulante



Se procedió a ajustar la cantidad de coagulante y de cloro de acuerdo a lo calculado en capítulos anteriores. La primera se ajustó a $1/8$ " de $1\frac{1}{2}$ " y la segunda a $1/4$ ".

Una vez llenado esto se procedió a instalar la bomba. Este proceso tuvo algunos percances, pero se hizo de la siguiente forma:

1. Se instaló una válvula de pie al inicio del tubo de succión de la bomba, esta funciona como una válvula antirretorno y no permite que el agua escape.
2. Se pegaron bien las tuberías y codos con el fin de que no hubieran filtraciones de aire. Se utilizó teflón entre el tubo de succión de la bomba
3. Se cebó la tubería de succión y la bomba para que la bomba pudiera succionar el fluido más fácilmente.

A continuación se verifica que el sistema de control se encuentre funcionando correctamente. Este debe ajustarse a unos 6 V que es la cantidad de voltaje que le tiene que llegar al ionizador. Es una dosis baja comparada con la que recomiendan los fabricantes que es de 12 V. Con esto se garantiza una mayor vida útil de los electrodos y una menor cantidad de cobre, plata y zinc añadida al agua. Esto se puede tomar como un factor de seguridad. En la figura 51 se muestra el tablero de control.

Figura 51. Sistema de control



ANÁLISIS MICROBIOLÓGICO

Se tomaron varias muestras y se les hizo un análisis físico, químico y microbiológico después de realizado el proceso. En la tabla 25 se muestran los valores promedios obtenidos para cada una de los valores. En esta misma tabla se muestran los límites superiores e inferiores para cada parámetro, sus unidades y las técnicas utilizadas para medir cada parámetro.

Tabla 25. Análisis microbiológico después del tratamiento

PARÁMETRO	RESULTADO	LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR	UNIDAD	TÉCNICA
Bacterias mesofílicas	59	0	100	ucf/100 ml	Filtración por membrana
Coliformes totales	0	0	0	ucf/100 ml	Filtración por membrana
Coliformes fecales	0	0	0	ucf/100 ml	Filtración por membrana

ANÁLISIS FÍSICO Y QUÍMICO

Se hizo el mismo procedimiento que para el análisis microbiológico. Los resultados se indican en la tabla 26.

Tabla 26. Análisis físico y químico después del tratamiento

PARÁMETRO	RESULTADO	*LÍMITE PERMISIBLE	UNIDAD	TÉCNICA
pH	7,67	6,5-9	---	St.Mth. 4500 H+B
Color	1	Máx. 15	UPC	HACH 120
Turbiedad	0,98	2	NTU	St.Mth. 2130 b
Conductividad	84,7	50-1000	Us/cm	St. Mth. 2510 b
Cloro residual	---	0,3-2	mg/l Cl_2	St. Mth. 4500 Cl G
Alcalinidad P	0	---	mg/l $CaCO_3$	St.Mth. 2320 B
Alcalinidad total	32	Máx 200	mg/l $CaCO_3$	St.Mth. 2320 B
Dureza total	40	300	mg/l $CaCO_3$	St.Mth. 2320 C

Es importante resaltar que las pruebas de laboratorio se hicieron en el laboratorio LABALIME y en los anexos se mostraran las copias de los resultados.

PORCENTAJE DE REMOCIÓN

Es un término que se utiliza muy frecuentemente en tratamiento de agua, indica el porcentaje de eliminación de un parámetro determinado después de que se le ha hecho un proceso. La ecuación que rige este porcentaje se expresa como:

$$\%Rem = [(R_i - R_f) / R_i] * 100$$

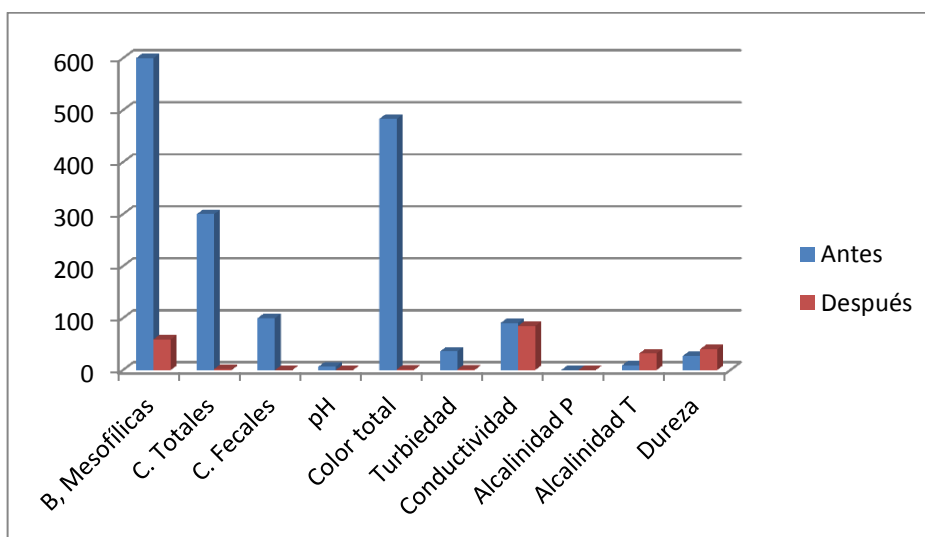
La tabla 27 hace un análisis comparativo entre la calidad del agua antes y después del tratamiento.

Tabla 27. Tabla comparativa análisis antes y después

PARÁMETRO	VALOR INICIAL	VALOR FINAL	% REMOCIÓN	LÍMITE
Bacterias mesofílicas	600	59	90,16	0-100
Coliformes totales	300	2	99,33	0
Coliformes fecales	100	0	100	0
pH	6,49	7.67	(Mejoría)	6,5-9
Color T	483	1	99,79	Máx. 15
Turbiedad	35,7	0,98	97,25	Máx. 2
Conductividad	90,5	84,7	6,40	50-1000
Cloro residual	---	---	---	0,3-2
Alcalinidad P	0	0	0	---
Alcalinidad total	9	32	Irrelevante	Máx. 200
Dureza	27	40	Irrelevante	300

En la figura 52 se muestra gráficamente los valores comparativos de los parámetros previamente mencionados. Se pueden observar los cambios antes (azul) y después (rojo) del proceso.

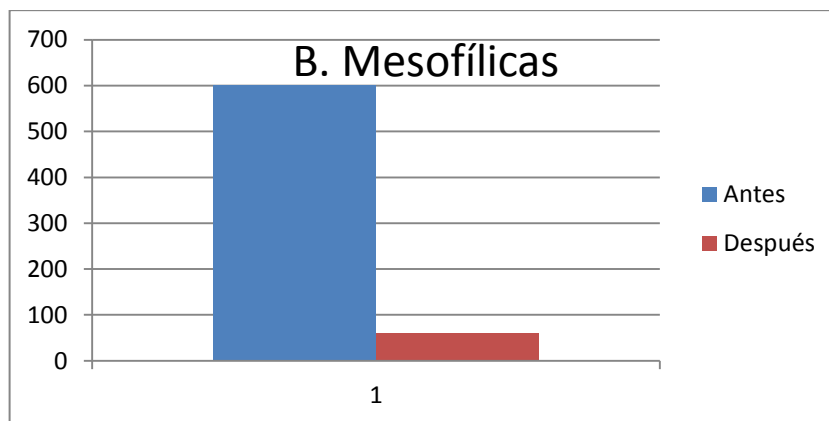
Figura 52. Comparación resultados antes y después del tratamiento



A continuación se muestran de manera individual los parámetros mencionados en la tabla 26. Se empieza con las Bacterias mesofílicas.

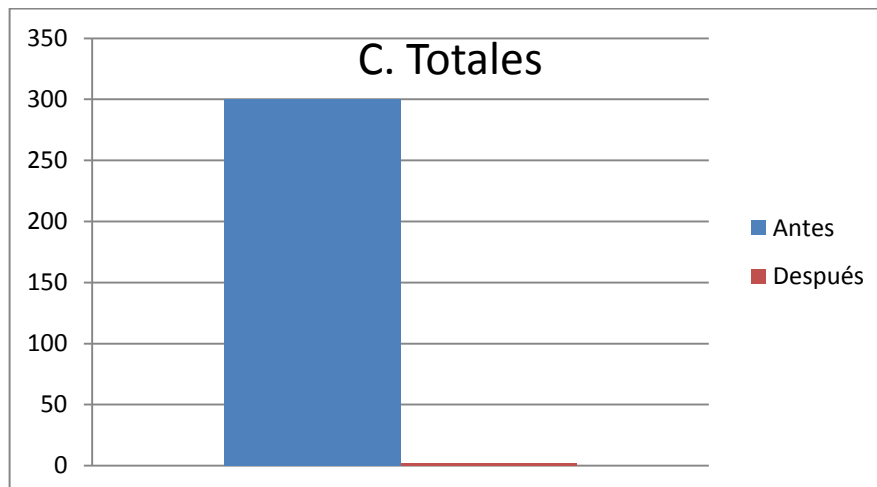
-Bacterias mesofílicas

Figura 53. Bacterias mesofílicas antes y después del tratamiento



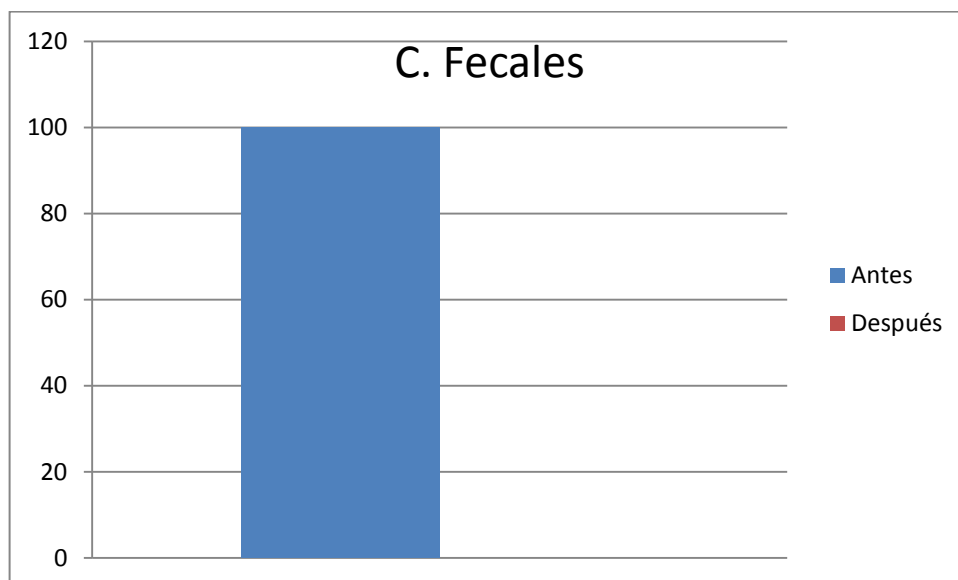
-Coliformes totales

Figura 54. Coliformes totales antes y después del proceso



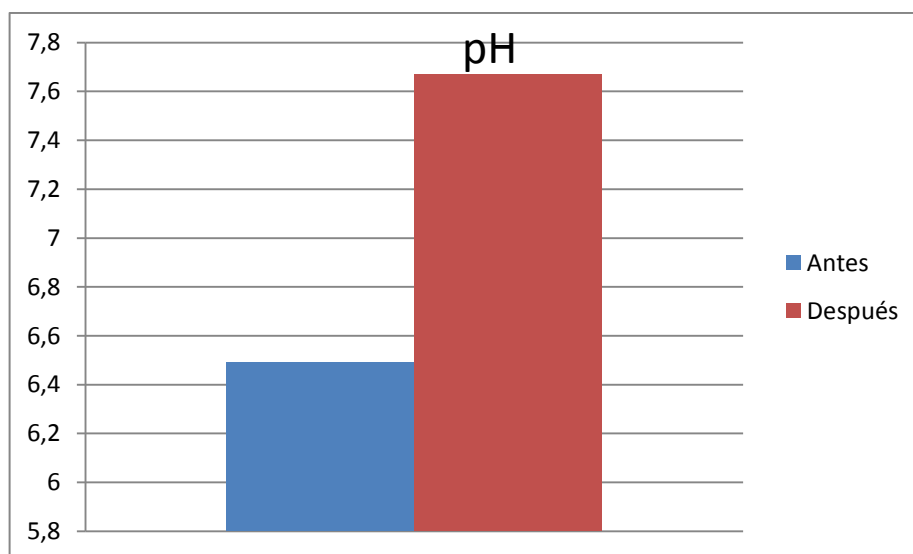
-Coliformes fecales

Figura 55. Coliformes fecales antes y después del proceso



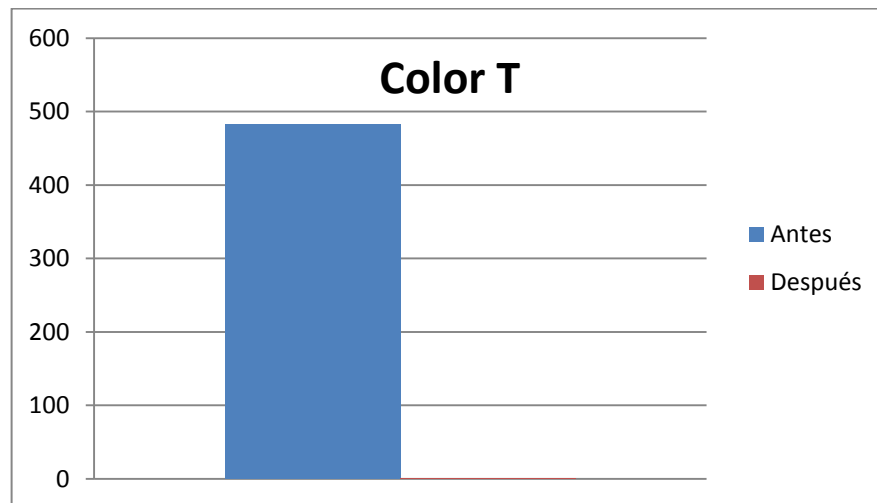
-pH

Figura 56. pH antes y después del tratamiento



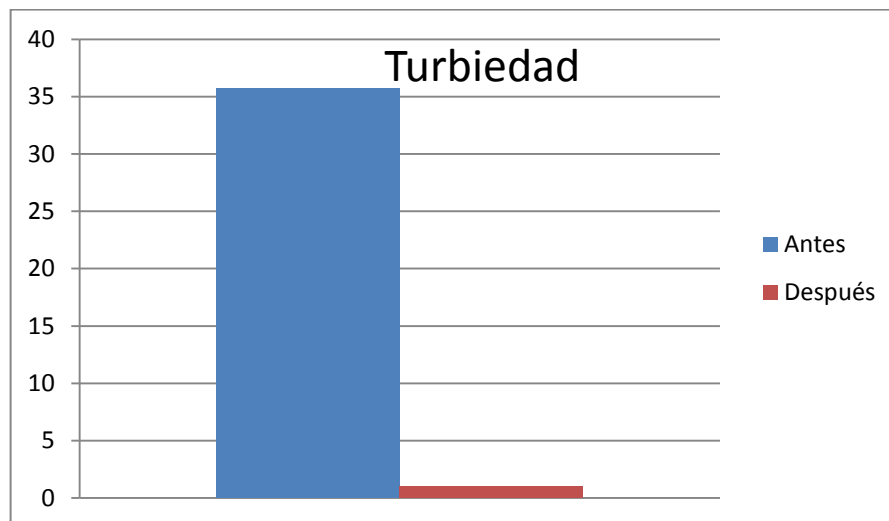
-Color total

Figura 57. Color total antes y después del proceso



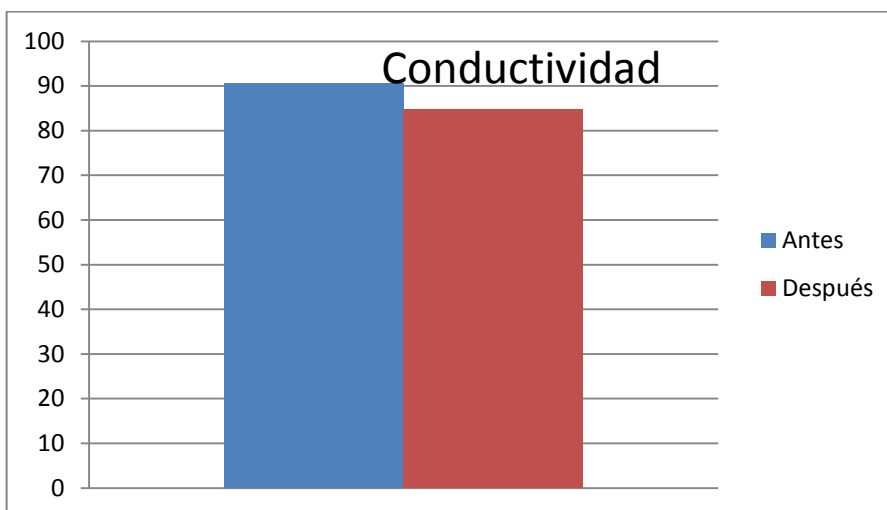
-Turbiedad

Figura 58. Turbiedad antes y después del proceso



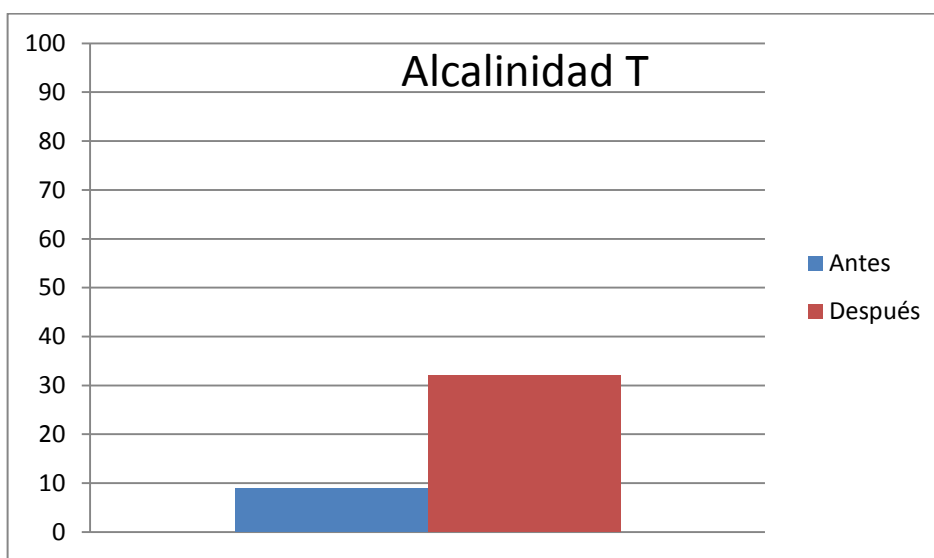
-Conductividad

Figura 59. Conductividad antes y después del proceso



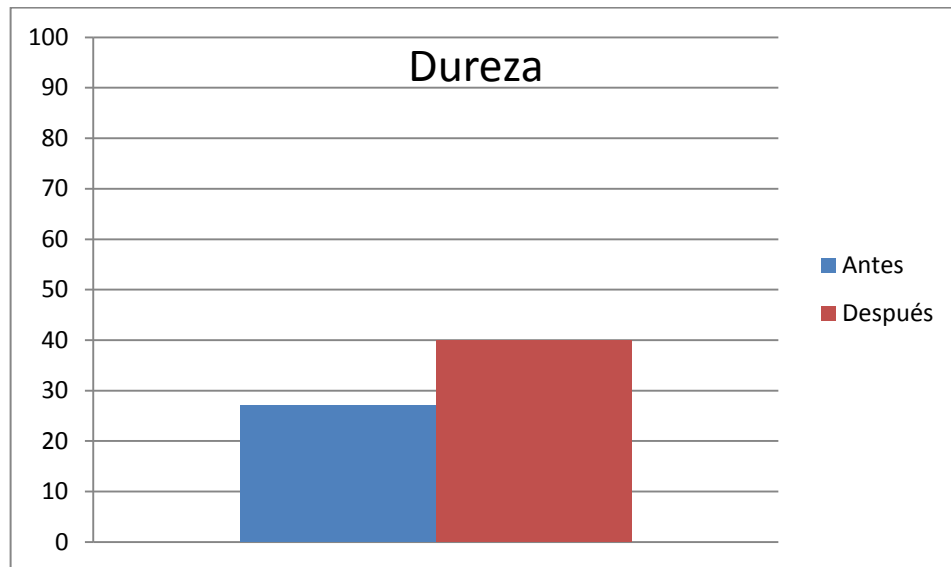
-Alcalinidad total

Figura 60. Alcalinidad total antes y después del proceso



- Dureza

Figura 61. Dureza antes y después del proceso

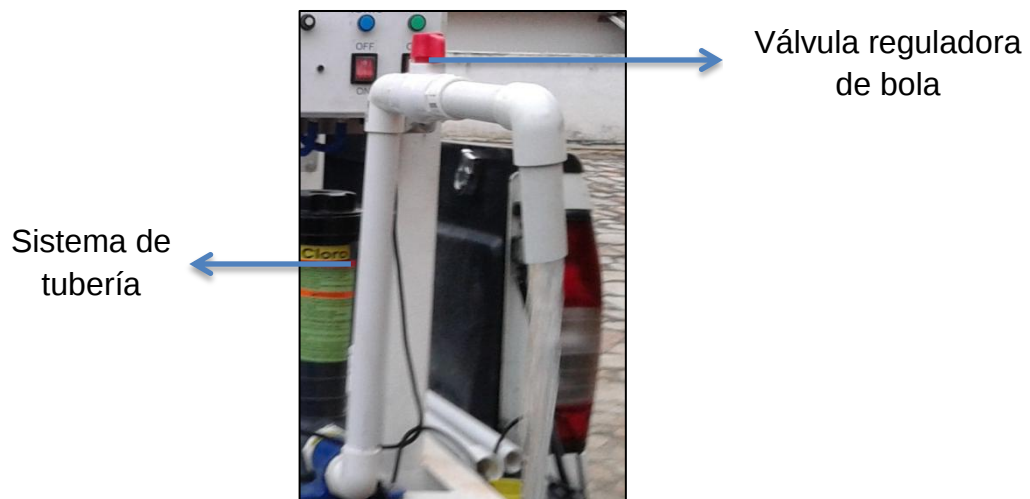


De lo anterior se puede concluir que se mejoraron en los siguientes aspectos:

- ✓ Se mejoró bastante el aspecto microbiológico de las pruebas. Hubo notables mejorías en los Coliformes totales, fecales y en las bacterias mesofílicas.
- ✓ La turbiedad y el color también se mejoraron bastante, lo cual le da un aspecto más estético al agua que se va a consumir.
- ✓ El pH se mejoró. Paso de estar en el límite inferior a un valor promedio cercano al neutro con tintes básicos.
- ✓ La alcalinidad y la dureza son valores que se tienen que tener en cuenta, sin embargo no cambiaron significativamente antes y después del proceso.

El sistema cuenta con una válvula de bola que permite regular el caudal de la salida. Esta válvula está acoplada a un sistema de tubería que se anexo a la planta para poder tomar la muestra.

Figura 62. Sistema toma de muestra



12. ANÁLISIS ECONÓMICO DEL PROTOTIPO

Para hacer un análisis correcto y completo de este proyecto se tienen en cuenta estos dos aspectos:

- Costos directos
- Costos indirectos

12.1 COSTOS DIRECTOS

Por costo directo puede entenderse como el costo de las materias primas más el costo de manufactura. En la tabla 28 se muestran los costos directos del proyecto.

Tabla 28. Costos directos

Ítem	Cantidad	Costo total [COP \$]
Estructura en fibra de vidrio 1X1X1 m	1	400.000
Soportes en fibra de vidrio	3	10000
Codos de PVC de 1 ½ in	18	36000
Machos de 1 ½ in	12	18000
Válvula multiport de 1 ½ in	2	215000
Tubería de 1 ½ in	13[m]	71500
Filtro en fibra de vidrio	8	200000
Tornillos para tapa de filtro de	8	8000
Arandelas para tapa de filtro	8	1000
Empaque para sellado de filtro	1	2000
Válvula de alivio de bola	1	4200

Ítem	Cantidad	Costo total [COP \$]
1 Bulto de arena de sílice de malla 20-30	50 kg	45700
1 Bulto de arena de sílice de malla 20-40	50 kg	55000
1 bulto de grava de ½-1/4 in	1	40000
1 bulto de grava de ¼-1/8 in	1	45000
Lámpara de mercurio de 15 W de baja presión	1	35000
Dosificador de cloro y alúmina modelo NO 70166	2	380000
Ionizador de cobre, plata y zinc	1	180000
Caja de control	1	300000
Lámina de aluminio	1	15000
Pigmentos	N/A	30000
Bomba centrífuga	1	125000
Otros 15%	N/A	332460
Costos totales		\$2'548.860

En la tabla 29 se muestran los costos del maquinado que están incluidos los costos en la mano de obra para la ejecución del proyecto.

Tabla 29. Costos mano de obra

Operación	Tiempo	Costo [COP \$]
Construcción de la estructura de reina reforzada con fibra de vidrio	50 min	50000
Construcción de filtro	30 min	20000
Taladrado	20min	10000
Colocación de sistemas hidráulico (válvulas, codos,	8 h(2 personas)	150000

válvula multiport, dosificadores de cloro y alúmina, etc.)		
Montura del sistema eléctrico	1h (1 persona)	20000
Costo total		250000

12.2 COSTOS INDIRECTOS

El costo indirecto comprende todos aquellos costos que no tienen relación directa con el producto.⁴⁷ En este se incluirán costos de diseño e ingeniería, transporte, entre otros. Un análisis más detallado se muestra en la tabla 30.

Tabla 30. Costos indirectos

Componente	Cantidad	Costo[COP \$]
Diseño e ingeniería	30 días	1'000.000
Técnico para montaje		200.000
Transporte y otros		200.000
Alumbre en roca	1kg	1000
Pastillas de cloro	1kg	11000
Costo total		\$1'412.000

12.3 COSTO TOTAL DE LA MÁQUINA

En la tabla 31 se muestran los costos totales de la máquina, aquí se incluyen los precios de los costos directos (materias primas, elementos adquiridos y de manufactura) y los costos indirectos.

⁴⁷ Jorge Olavarrieta de la Torre. Conceptos generales de productividad, sistemas, normalización y competitividad para la pequeña y mediana empresa. Edición en español. Universidad Iberoamericana. México. 1999.

Tabla 31. Costo total de la máquina

Componente	Costo [COP \$]
Costo de materia prima y elementos adquiridos	2'548.860
Costos de maquinado	250000
Costos indirectos	1'412.000
Costo total del proyecto	4'210.860

13. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó una planta portátil de tratamiento de agua con las siguientes características:

Sistema que tiene la capacidad de procesar 500 l/h de agua, de tipo de operación manual que es capaz de tratar aguas superficiales y subterráneas. Se hicieron pruebas con un agua superficial que tenía casi 40 NTU de turbiedad y color de más de 300 y se pudo eliminar en más de un 90% estos parámetros.

El agua salió con un nivel microbiológico muy bueno, lo cual la hace apta para el consumo humano sin representar un riesgo para la salud de los consumidores. Se pasó de:

Bacterias mesofílicas 600 a 59 lo cual indica una reducción del 90,16%.

Coliformes fecales de 100 a 0 lo cual indica una reducción del 100%.

Se construyó un prototipo de peso ligero y que fácilmente puede ser llevado a zonas rurales en un vehículo debido a sus dimensiones de 1X1X1 m.

Se hicieron las pruebas antes y después del proceso y se comprobó que la planta cumple con la normatividad especificada por la norma colombiana (Resolución 2115 del 22 de junio de 2007) en cuanto a los análisis básicos que incluyen: color, turbiedad, conductividad, cloro residual, alcalinidad y dureza total, coliformes totales, fecales y bacterias mesofílicas.

La construcción se hizo principalmente con materiales y elementos que se encuentran en la región, lo que facilita la adquisición de sus repuestos y partes y hace más fácil su mantenimiento.

Para el diseño hidráulico se hizo un análisis de pérdidas de tuberías, selección de bomba y elementos hidráulicos.

Se hizo un estudio de análisis económico de la planta, y de manera general se puede notar que aunque la inversión inicial es costosa (4'210.860), esta planta puede abastecer a un gran número de familias, lo cual reduciría la inversión si se comprara en conjunto.

Se implementaron procesos que no se utilizan a menudo en el país, se está hablando de dos en específico: luz UV e ionización con cobre, plata y zinc. El primero permitió eliminar bacterias, virus y en general microorganismos que el cloro ha mostrado su baja efectividad, el segundo genera un efecto residual en el agua superior al cloro (hasta por 30 días) lo que permite almacenar y prolongar la vida útil del agua potable hasta por 30 días en almacenamiento, sin permitir que ésta sea afectada por contaminantes externos y reducir contaminación por metales pesados, cloro y sulfuros de hidrógeno.

El proyecto contribuyó a mi desarrollo como Ingeniero Mecánico, además fue una oportunidad de extenderme, trabajando con profesionales de otros sectores, lo cual me permitió realizar un trabajo multidisciplinar. En el proceso tuve que trabajar con bacteriólogos, ingenieros químicos y ambientales.

14. RECOMENDACIONES

Utilizar un buen empaque y una buena silicona (preferiblemente silicona de motor roja) para eliminar cualquier filtración posible de agua a través de la tapa del filtro.

Se necesita usar una válvula de pie para la tubería de succión, esto con el fin de evitar pérdidas de agua por esta parte de la tubería.

La tubería de succión deber ser cebada correctamente, esto es, llenar de agua la tubería de succión y la carcasa de la bomba para facilitar el flujo del líquido. Una pequeña cantidad de aire en esta sección de tubería ocasionará que la bomba no funcione de una forma adecuada.

Utilizar la válvula multiport siempre en sentido de las manecillas del reloj para evitar un daño en ella.

Purgar la planta antes de utilizar, esto es, sacarle cualquier cantidad de aire que pueda tener dentro de sus tuberías o accesorios puede alterar el sistema. Para ello se instaló una válvula de bola encima de la tapa de filtro que deberá ser cerrada una vez salga agua a través de ella.

Utilizar hipoclorito de calcio en pastillas como elemento de cloración preferiblemente al 91% para tener la menor cantidad de material inerte posible.

Si el agua presenta mucha turbiedad utilizar sulfato de aluminio tipo B que es un poco más fuerte. Para el agua que se tomó se utilizó del tipo A.

Proteger el sistema de control de cualquier fluido que pueda llamarse agua u otro para evitar que se dañe la parte electrónico, con esto no funcionarían ni los procesos de luz UV e ionización.

Colocar la válvula multiport en modo filtración antes de iniciar a tratar el agua, esto con el fin de asentar el lecho filtrante para que quede uniforme.

BIBLIOGRAFÍA

ANDÍA Yolanda. Tratamiento de agua: Coagulación y floculación. 1ed. Lima. 2010. 44p.

ASKELAND, Donald R. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. 3 ed. México: International Thomson Editores, 1998. 854p.

CASTRILLÓN Daniela. GIRALDO María. Determinación de las dosis óptimas del coagulante sulfato de aluminio granulado tipo B en función de la turbiedad y el color para la potabilización del agua en la planta de tratamiento de Villa Santana. Proyecto de grado en Tecnología Química. Universidad Tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira, 2012. 103p.

CENGEL, Yunus A. BOLES, Michael A. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones. 6 ed. México, McGraw Hill, 2009, 1020 p.

CENGEL, Yunus A. BOLES, Michael A. Termodinámica 4 ed. México, McGraw Hill, 2009, 1048 p.

CHEREMINISOFF Nicholas P. Handbook of Water and Wastewater Treatment Technologies. 1 ed. Boston: BUTTERWORTH HEINEMANN., 2002. 636p.

COMISIÓN NACIONAL DE AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. NOM-127-SSA-1-194. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. 1ed. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007. 329p.

COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Diseño de Plantas Potabilizadoras Tipo de Tecnología Simplificada. 1ed. México, D.F.: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2007. 329p.

COULSON, Richardson. Chemical engineering Volume 2. Particle technology and separation processes. Editorial Butterworth Heinemann. 5 Edición.

CRAWFORD Mary H. BANAS Michael A. ROSS Michael P. Final LDRD Report: Ultraviolet Water Purification Systems for Rural Environments and Mobile Applications. Albuquerque : Sandia National Laboratories, 2005. 37p.

DANE. Censo 2005. [en línea] Consultado el: 5 de Mayo de 2014 Disponible en: www.dane.gov.co.

DOCUMENTACIÓN TÉCNICO NORMATIVA DEL SECTOR DEL AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO. NORMAS RAS 2000

EPA (United States Environmental Protection Agency) ULTRAVIOLET DISINFECTION GUIDANCE MANUAL FOR THE FINAL LONG TERM 2 ENHANCED SURFACE WATER TREATMENT RULE, 2006. 436p

FAIRES , V. M. Diseño de Elementos de máquinas. 4 ed. Mantener y Simon S.A, Barcelona. 802 p.

FERNÁNDEZ ESCARTÍN E, COSTARRICA GONZÁLEZ ML, PARRILLA CERRILLO C, ed. Técnicas para el muestreo y análisis microbiológico de alimentos. México, D.F.: Secretaría de Salubridad y Asistencia, 1975.

GEANKOPLIS, C.J. Procesos de transporte y operaciones unitarias. Tercera Edición. Compañía editorial continental S.A. de C.V. México, 1998.

GROOVER, Mikell P. Fundamentos De Manufactura Moderna: Materiales, Procesos Y Sistemas. México, DF: Prentice Hall Hispanoamericana, 1997. 1062p.

HOWE, Kerry J. HAND David W. CRITTENDEN John C. TRUSSELL Rhodes. TCHOBANOGLOUS George. Principle of Water Treatment. 1ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2012. 654p.

JACKSON P.J. DILLON GR. Manual on Treatment for Small Water Supply Systems: Final Report to the Department of the Environment, Transport and the Regions.

LEVENSPIEL, O. Flujo de fluidos. Intercambio de calor. Capítulo 6. Flujo a través de lechos rellenos, Editorial Reverté, 1996.

MARRUEGO José Luis. Evaluación de la contaminación por metales pesados en la Ciénega la soledad y bahía de Cispatá. Universidad de Córdoba. 2011.

MARTÍNEZ DE LA ROSA, Gerson Jonathan. Evaluación de dos Agentes Ablandadores de Agua y su Mezcla para Ajustar el Índice de Langelier en Recirculación de Aguas de Enfriamiento y Estabilizar Parámetros Químicos en Calderas de Vapor. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Guatemala, Octubre de 2012. [en línea]

Consultado el: 4 de Junio de 2014. Disponible en:
http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1277_Q.pdf

MCLAREN. Donald. Novedades científicas alemanas. Plástico reforzado con fibra de vidrio. Vol. XXVII.600. Noviembre de 1995.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONÓMICO DE COLOMBIA. Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico RAS-2000.

MONTT, Robert L. Mecánica de Fluidos. 6 ed. México: Pearson Educación, 2006. 644p.

MONTT, Robert L. Mecánica de Fluidos. 6 ed. México: Pearson Educación, 2006. 644p.

NORTON, Robert L. Diseño de Máquinas .Prentice Hall, México, 1999. 1080p

OLAVARRIETA Jorge. Conceptos generales de productividad, sistemas, normalización y competitividad para la pequeña y mediana empresa. 1 ed. México: Universidad Iberoamericana, 1999. 80p.

ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Agua, saneamiento y salud. Agua potable salubre y saneamiento básico en pro de la salud [en línea] Consultado el: 5 de Mayo de 2014. Disponible en:
http://www.who.int/water_sanitation_health/mdg1/es/.

PÉREZ J.A. ESPIGARES M. Desinfección del agua: Cloración 1ed. Granada: Universidad de Granada, 1995. 18p

ROMERO, Jairo Alberto. ACUIPURIFICACIÓN: Diseño de sistemas de purificación de aguas. 2 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1997. 308p.

ROMERO, Jairo Alberto. ACUIQUIMICA. 1 ed. Bogotá: Departamento de Publicaciones Escuela Colombiana de Ingeniería, 1996. 226p.

SALTON MJR, Kim KS (1996) Structure. in: Baron's Medical Microbiology (Baron S et al, eds.) (4th ed. edición). Univ of Texas Medical Branch.

SECRETARÍA DE SALUBRIDAD Y ASISTENCIA. Análisis bacteriológico del agua para el control de su potabilidad. Boletín Informativo 1973;II (10):2-11.

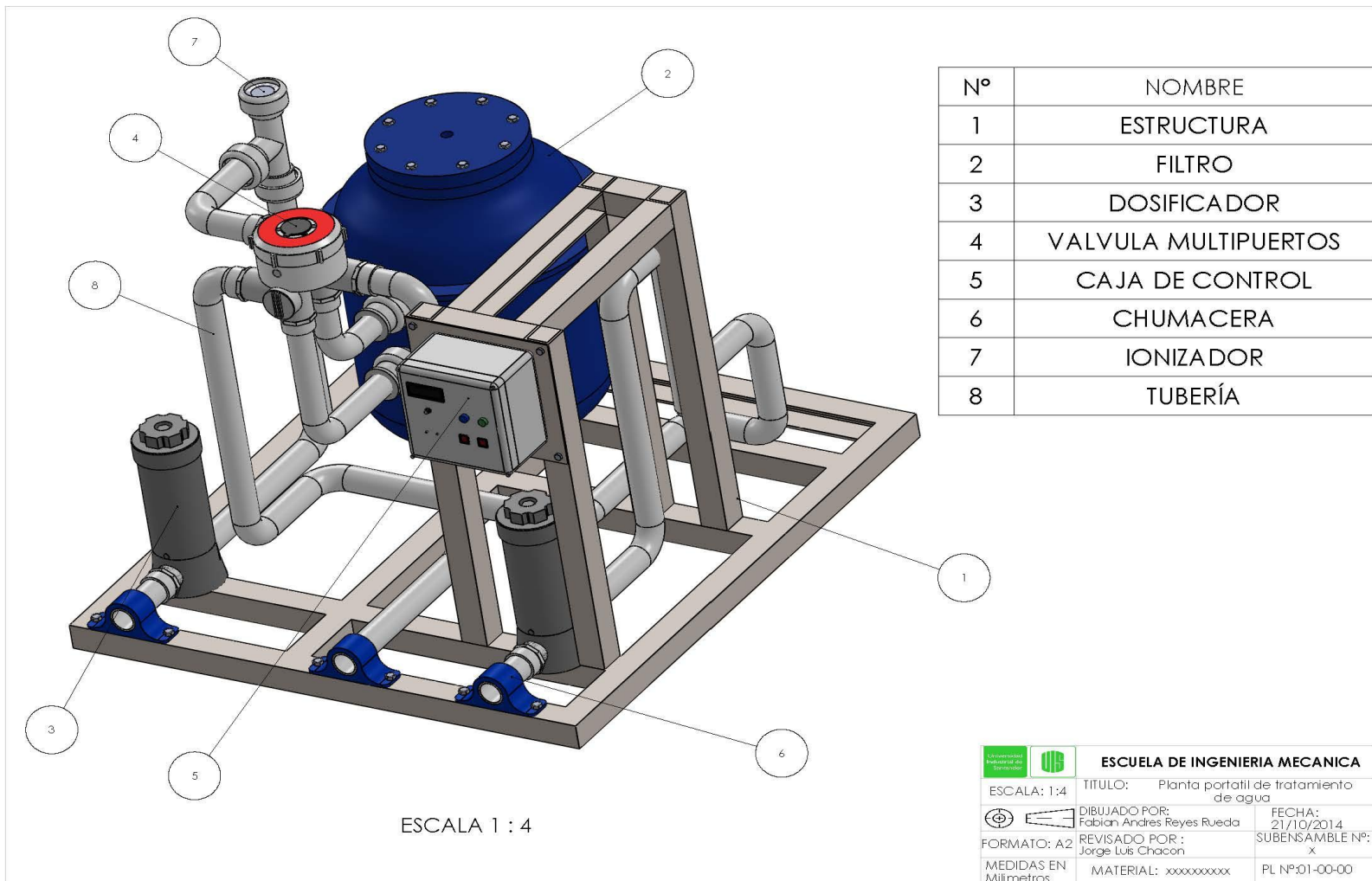
VERA BRITO Nancy. Alternativas de potabilización para el agua que abastecerá a la ampliación del aeropuerto internacional de la ciudad de Mexico. Instituto Politécnico Nacional Tesis para obtener el título de Ingeniero civil. Mexico 2007. [en línea] Consultado el 4 de Octubre de 2014. Disponible en <http://www.elaguapotable.com/ALTERNATPOTAB.pdf>.

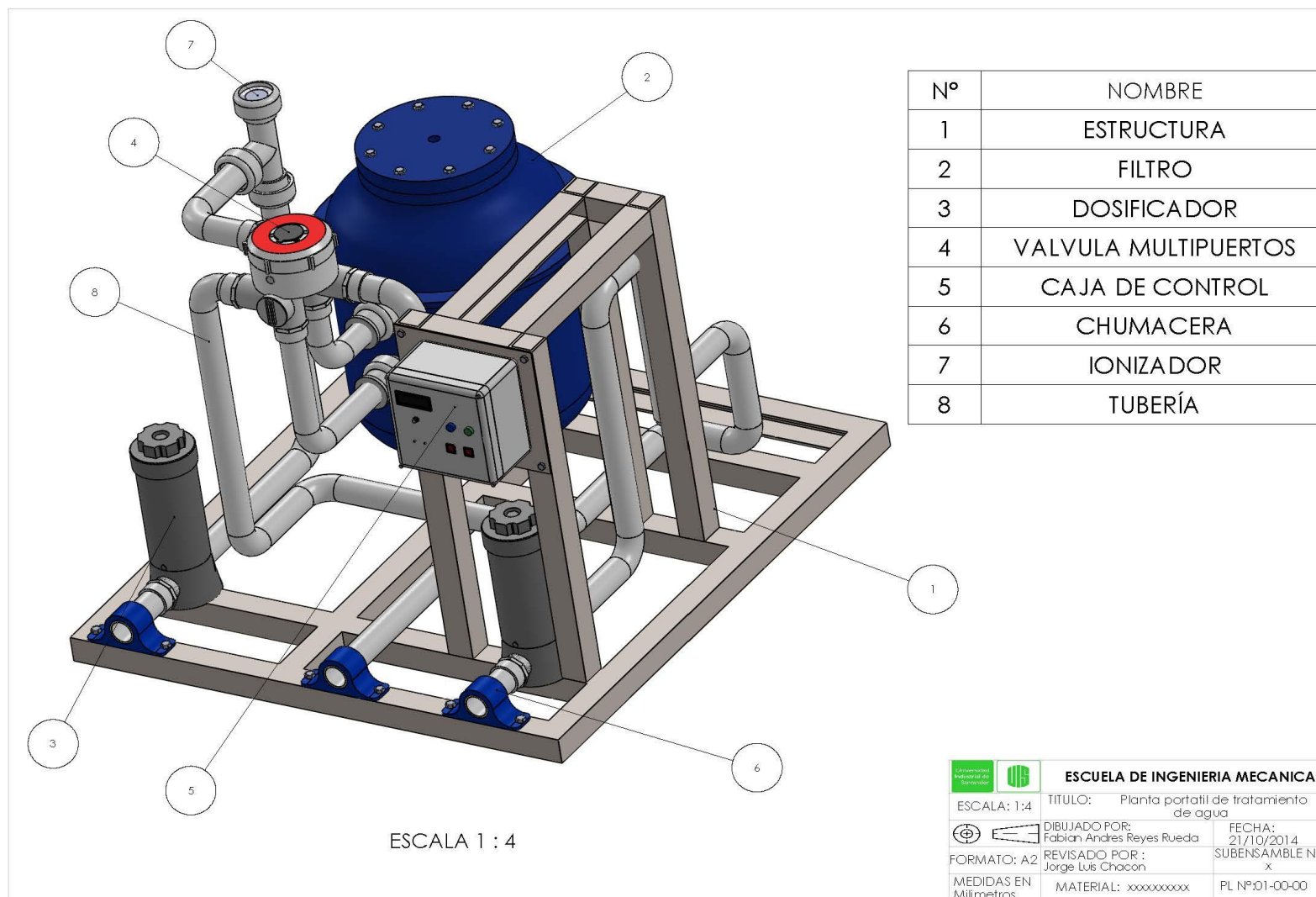
WORLD HEALTH ORGANIZATION, WHO. Managing water in the Home: Accelerated Health Gains from Improved Water Supply. 2002. 82p.

ANEXOS

ANEXO A. Planos



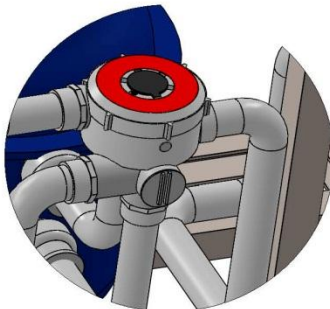




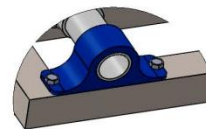
IONIZADOR



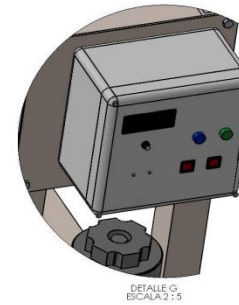
VALVULA MULTIPUERTOS



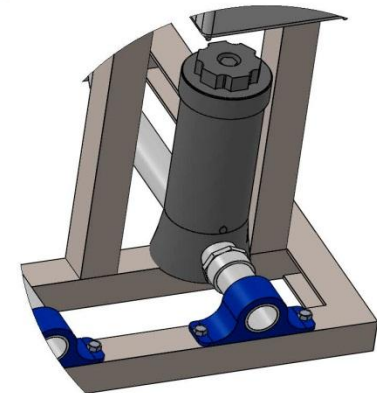
CHUMACERA



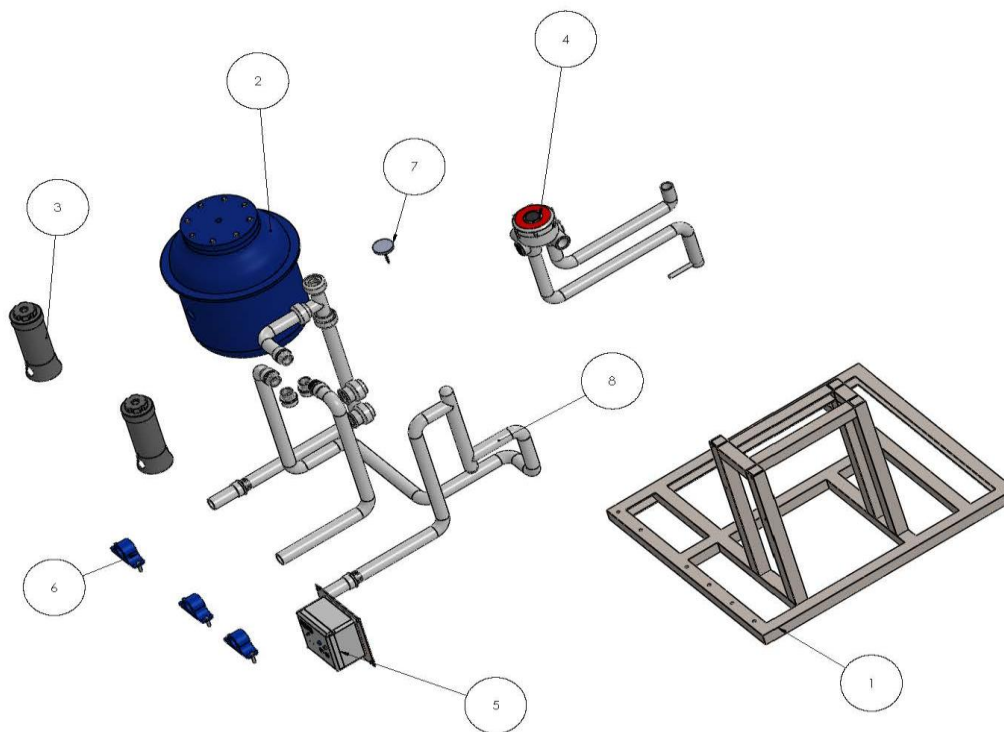
TABLERO DE CONTROL



DOSIFICADOR

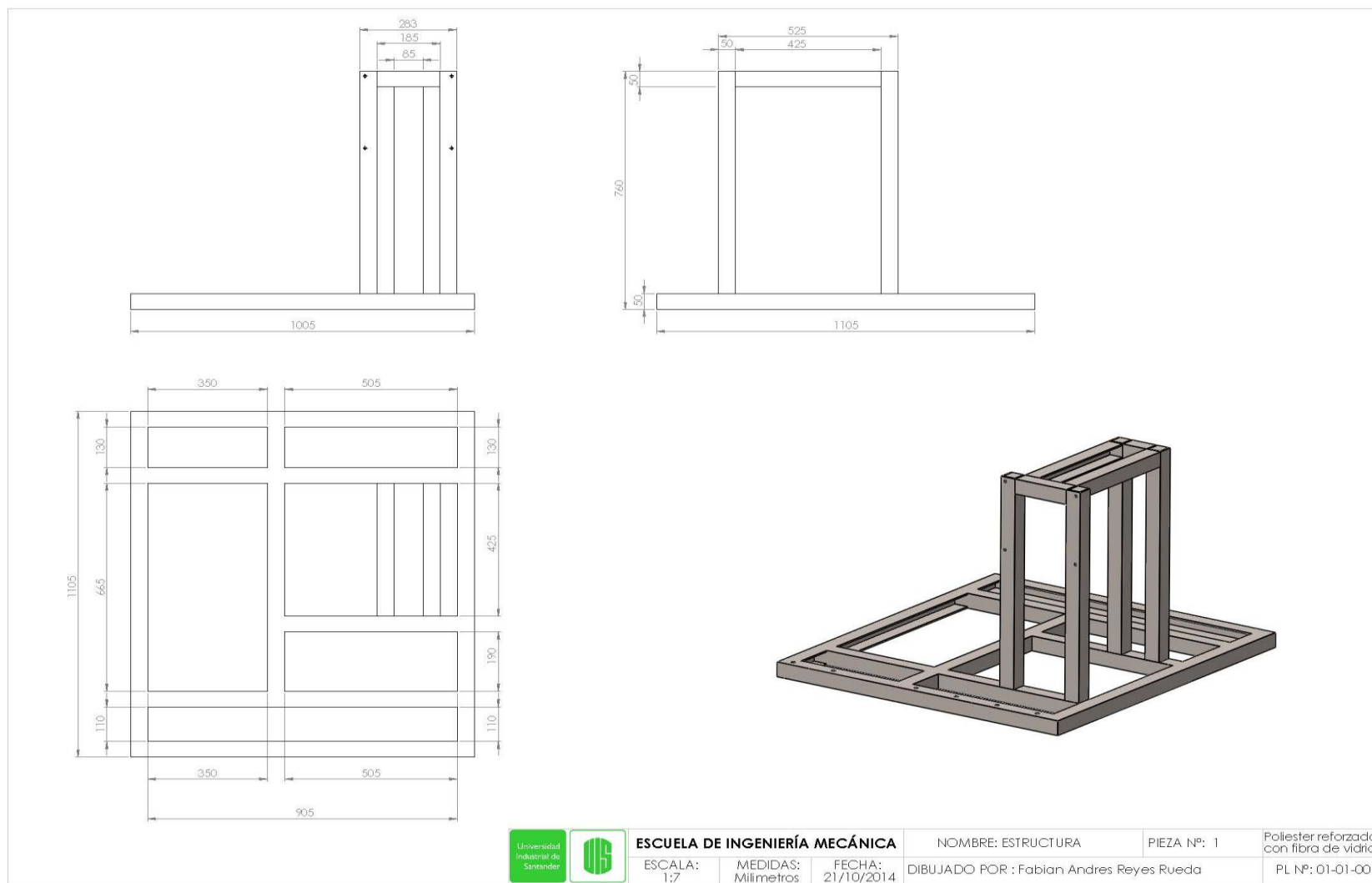


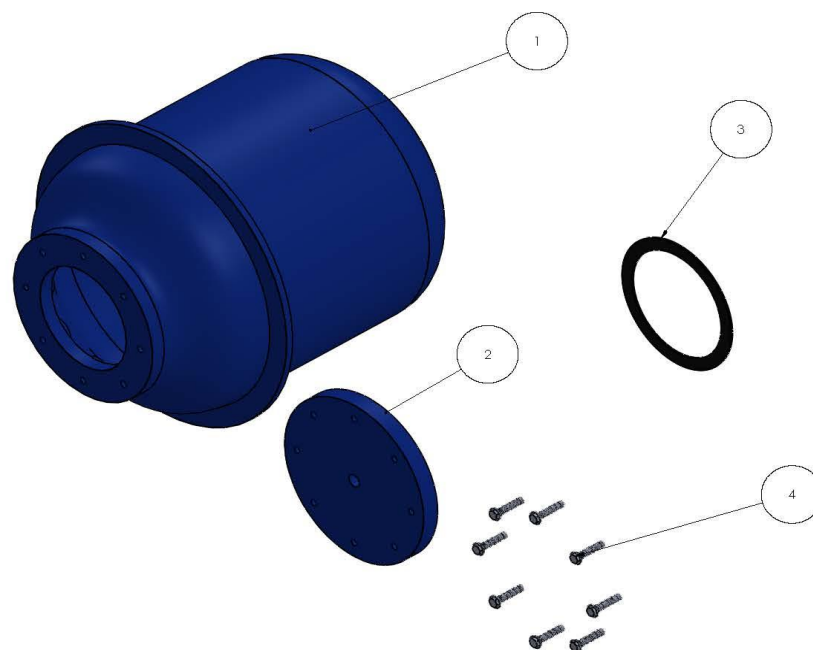
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			
ESCALA: 1:5	TITULO: Detalles de la planta portatil de tratamiento de agua		
	DIBUJADO POR:	FECHA: 21/10/2014	
	Fabian Andres Reyes Rueda		
FORMATO: A1	REVISADO POR:	SUBENSAMBLE N°:	
	Jorge Luis Chacon	x	
MEDIDAS EN Milímetros	MATERIAL: xxxxxxxxxxxxxx	PL N°: 01-00-00	



Nº	NOMBRE
1	ESTRUCTURA
2	FILTRO
3	DOSIFICADOR
4	VALVULA MULTIPUERTOS
5	TABLERO DE CONTROL
6	CHUMACERA
7	IONIZADOR
8	TUBERÍA

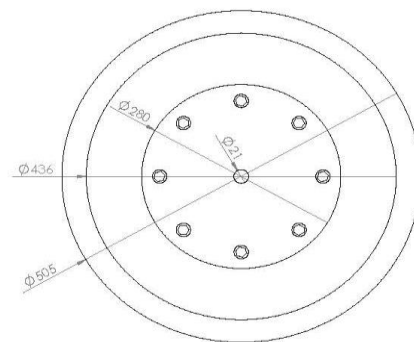
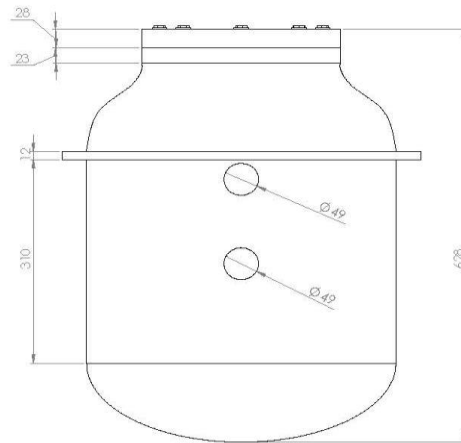
 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		
ESCALA: 1:10	TITULO: Explosion Planta portatil de tratamiento de agua	
 FORMATO: A2	DIBUJADO POR: Fabian Andres Reyes Rueda	FECHA: 21/10/2014
	REVISADO POR : Jorge Luis Chacon	SUBENSAMBLE Nº: x
MEDIDAS EN Milímetros	MATERIAL: xxxxxxxxxxxx	PL Nº:01-00-00





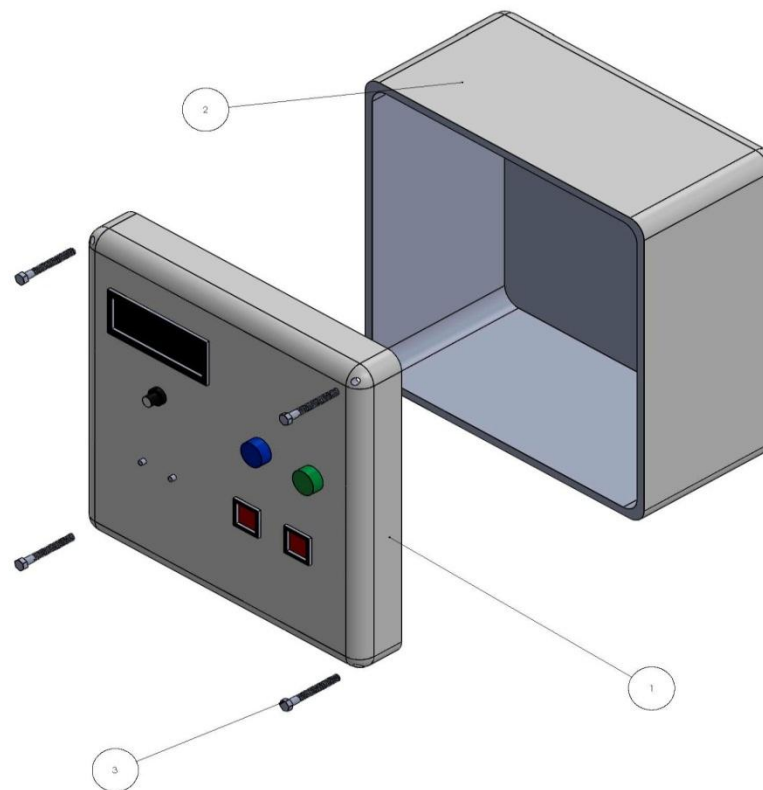
Nº	NOMBRE
1	CUERPO FILTRO
2	TAPA FILTRO
3	EMPAQUE
4	TORNILLOS

 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	
ESCALA: 1:4	TITULO: Explosión filtro de la planta portátil de tratamiento de agua
	DIBUJADO POR: Fabian Andres Reyes Rueda FECHA: 21/10/2014
FORMATO: A2	REVISADO POR: Jorge Luis Chacon SUBENSAMBLE Nº: 2
MEDIDAS EN Milímetros	MATERIAL: Poliester reforzada de fibra de vidrio PL Nº01-02-00

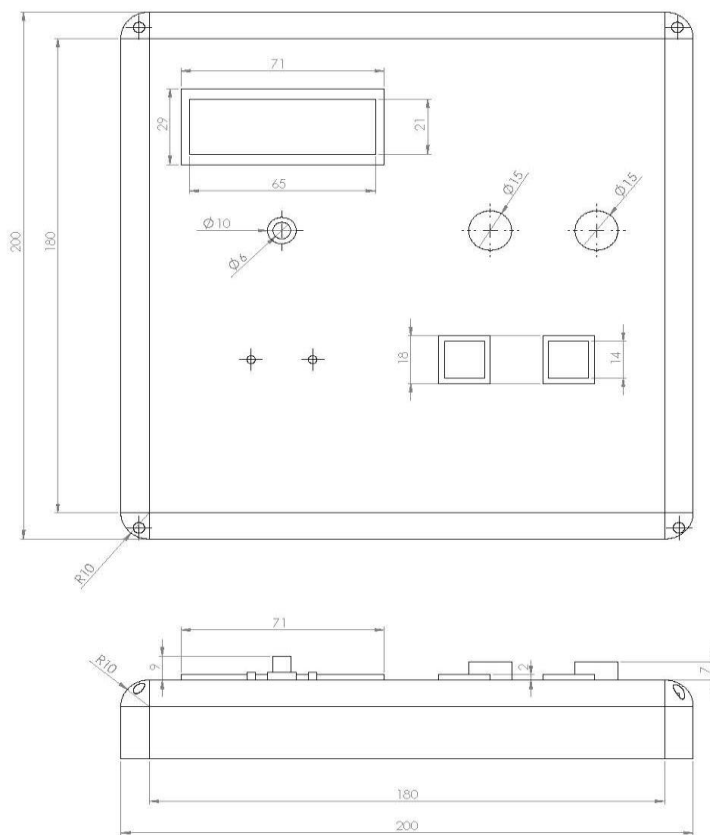


		ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	
ESCALA: 1:4		TITULO: Filtro de la planta portatil de tratamiento de agua	
	DIBUJADO POR: Fabian Andres Reyes Rueda	FECHA: 21/10/2014	
FORMATO: A2	REVISADO POR: Jorge Luis Chacon	SUBENSAMBLE N°: 2	
MEDIDAS EN Milímetros	MATERIAL: Polyester reforzada de fibra de vidrio	PL N°01-02-00	

Nº	NOMBRE
1	TAPA TABLERO DE CONTROL
2	CUERPO TABLERO DE CONTROL
3	TORNILLERIA



 ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA	
ESCALA: 1:1	TITULO: Tablero de control de la planta portátil de tratamiento de agua
 DIBUJADO POR: Fabian Andres Reyes Rueda REVISADO POR: Jorge Luis Chacon	FECHA: 21/10/2014
FORMATO: A2	SUBENSAMBLE Nº: 5
MEDIDAS EN Milímetros	MATERIAL: Fabricante
	PL Nº: 01-05-00



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
1:1

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

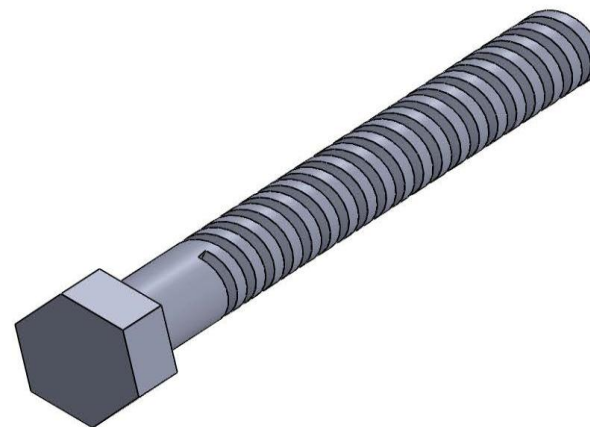
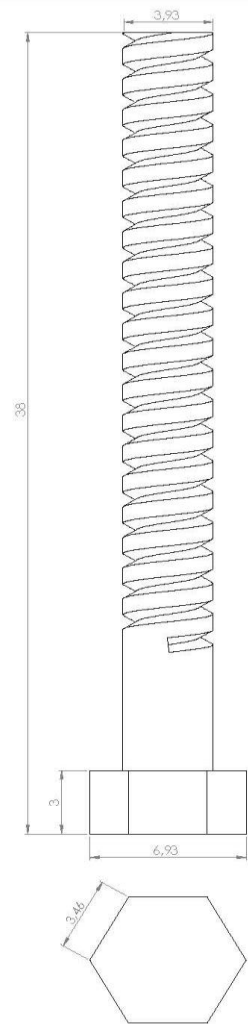
NOMBRE: TAPA TABLERO DE CONTROL

PIEZA N°: 5

FABRICANTE

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL N°: 01-05-01



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
5:1

MEDIDAS:
Milímetros

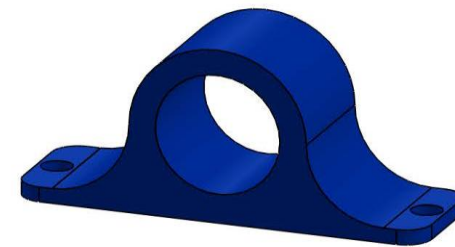
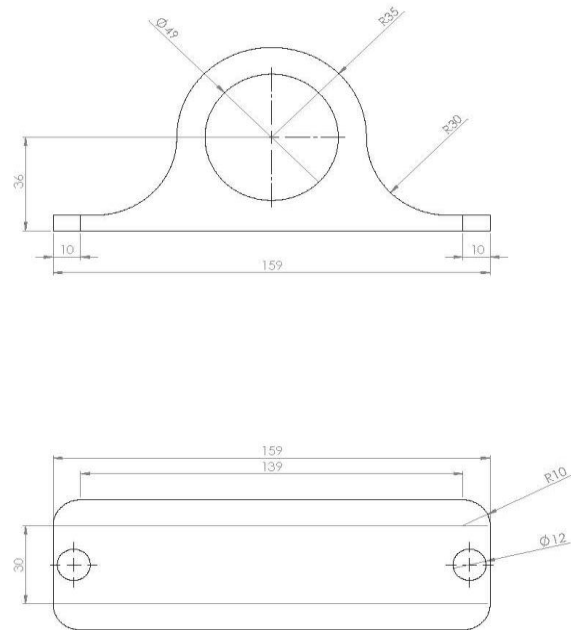
FECHA:
21/10/2014

NOMBRE: TORNILLERÍA TABLERO DE CONTROL

PIEZA Nº: 5

FABRICANTE

PL Nº: 01-05-03



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
1:1

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

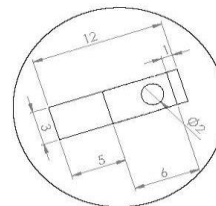
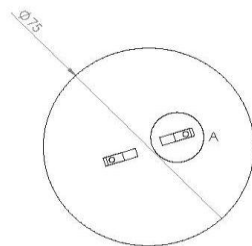
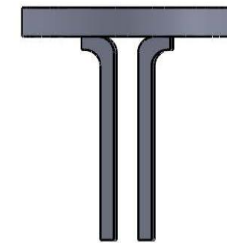
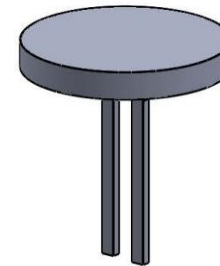
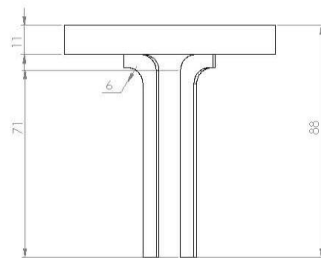
NOMBRE: CHUMACERA

PIEZA Nº: 6

FABRICANTE

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL Nº: 01-06-00



DETALLE A
ESCALA 4 : 1



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
1:1

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

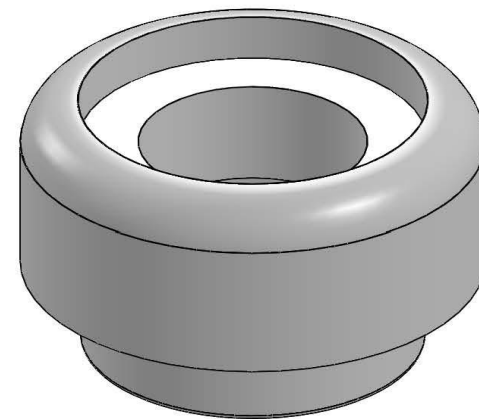
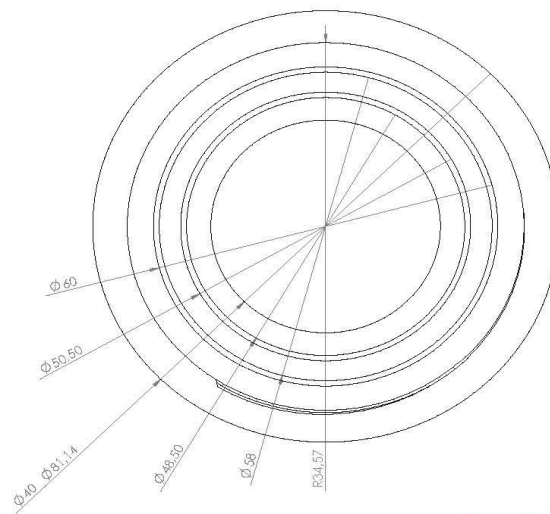
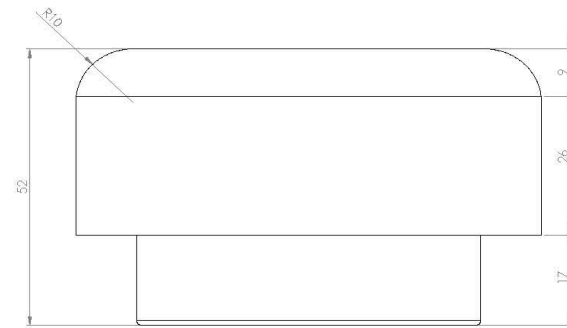
NOMBRE: IONIZADOR

PIEZA Nº: 7

COBRE-PLATA

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL Nº: 01-07-00



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
2:1

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

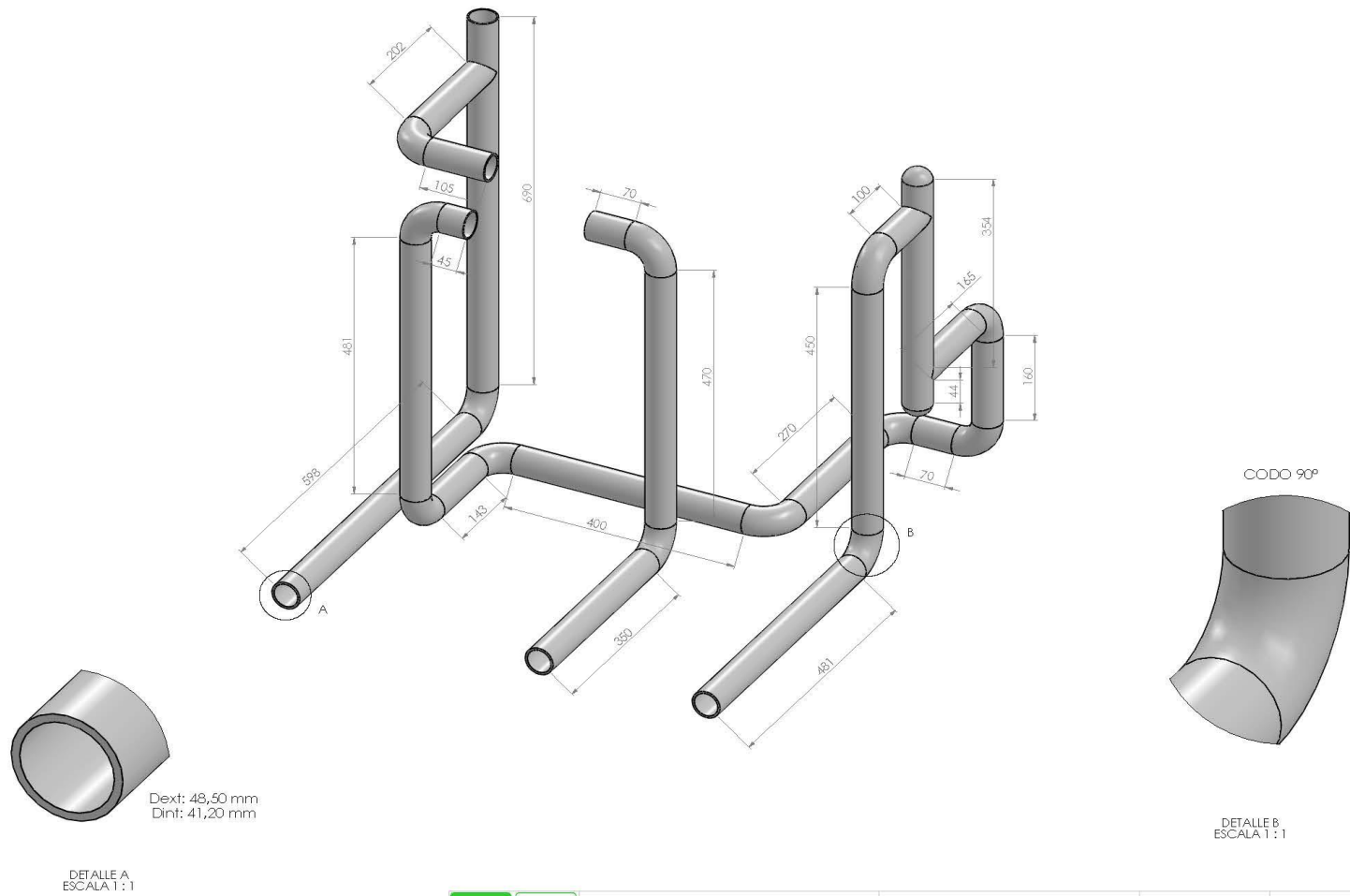
NOMBRE: UNION UNIVERSAL

PIEZA Nº: 9

PLASTICO: PVC

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL Nº: 01-09-00



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
1:4

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

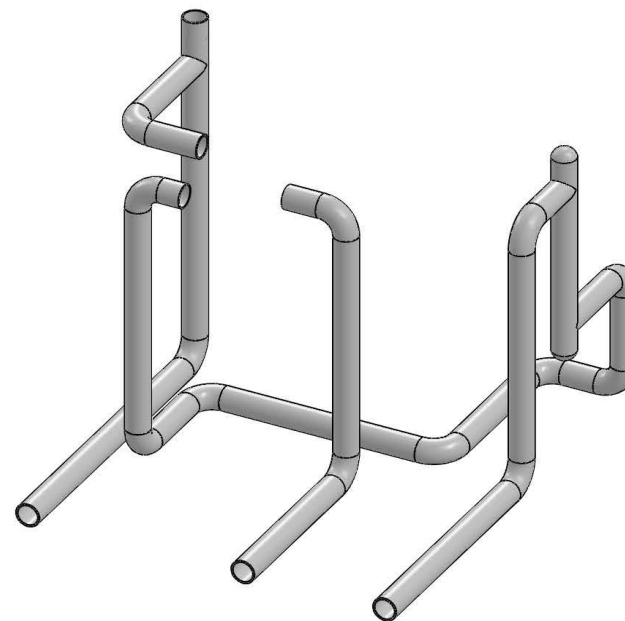
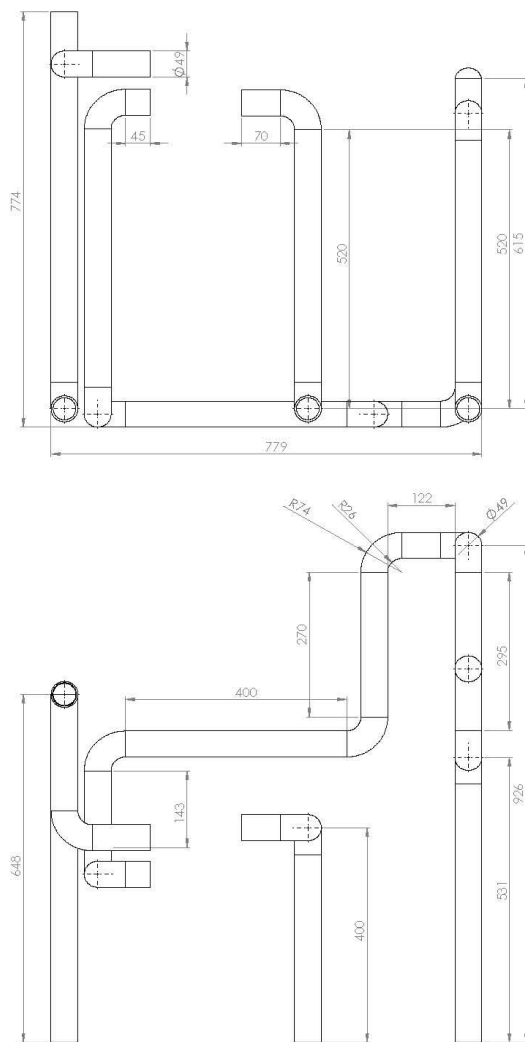
NOMBRE: TUBERIA

PIEZA N°: 8

PLASTICO: PVC

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL N°: 01-08-00



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
1:5

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

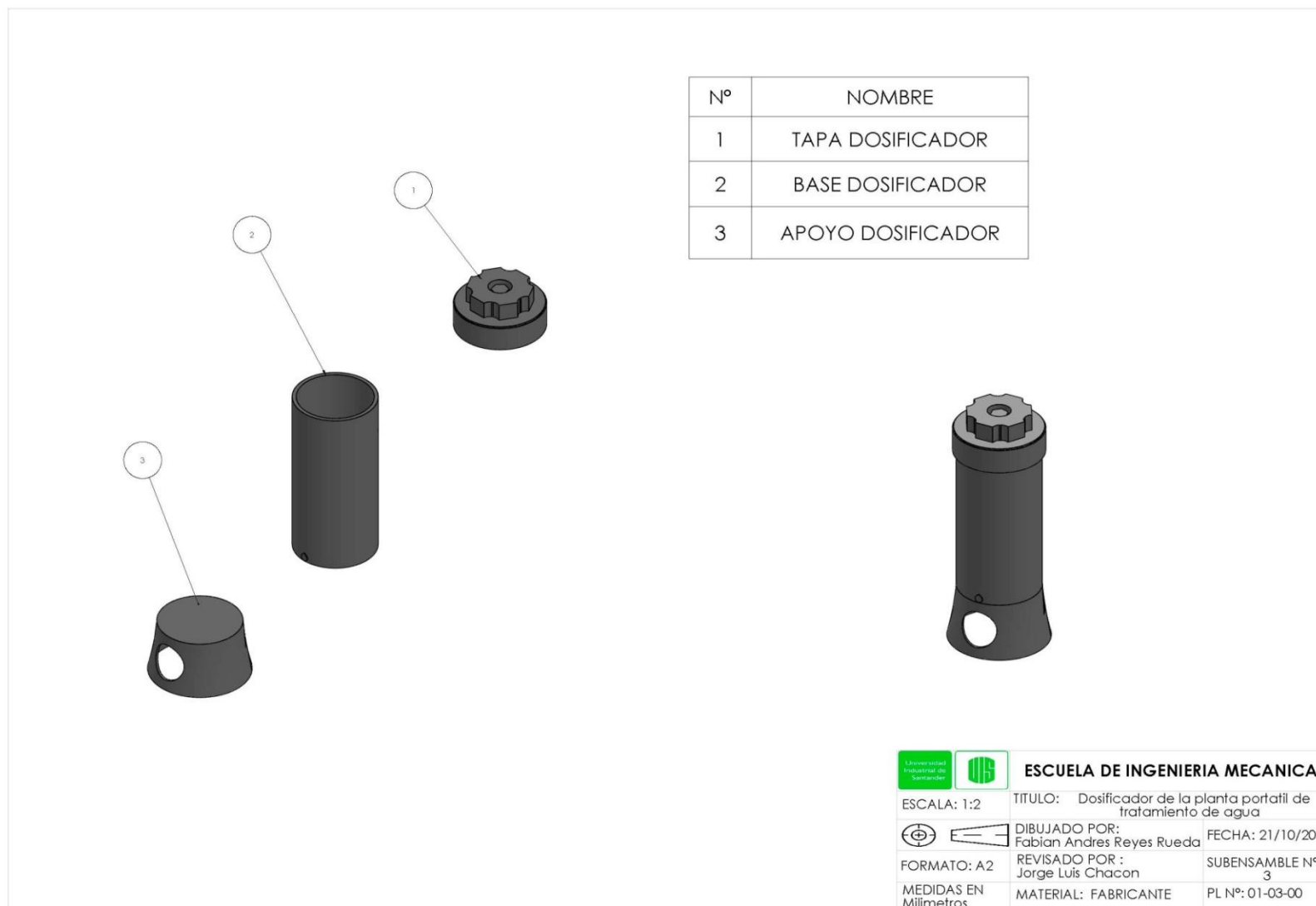
NOMBRE: TUBERIA

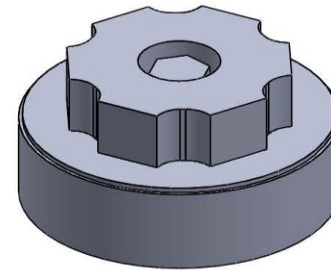
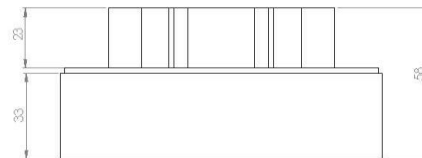
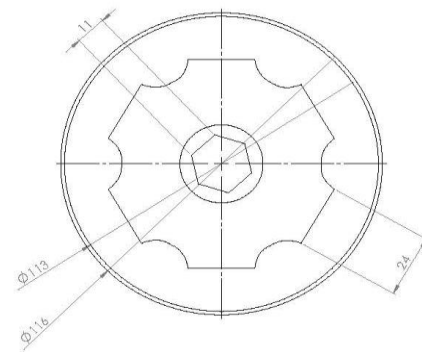
PIEZA Nº: 8

PLASTICO: PVC

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL Nº: 01-08-00





ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

NOMBRE: TAPA DOSIFICADOR

PIEZA Nº: 3

FABRICANTE

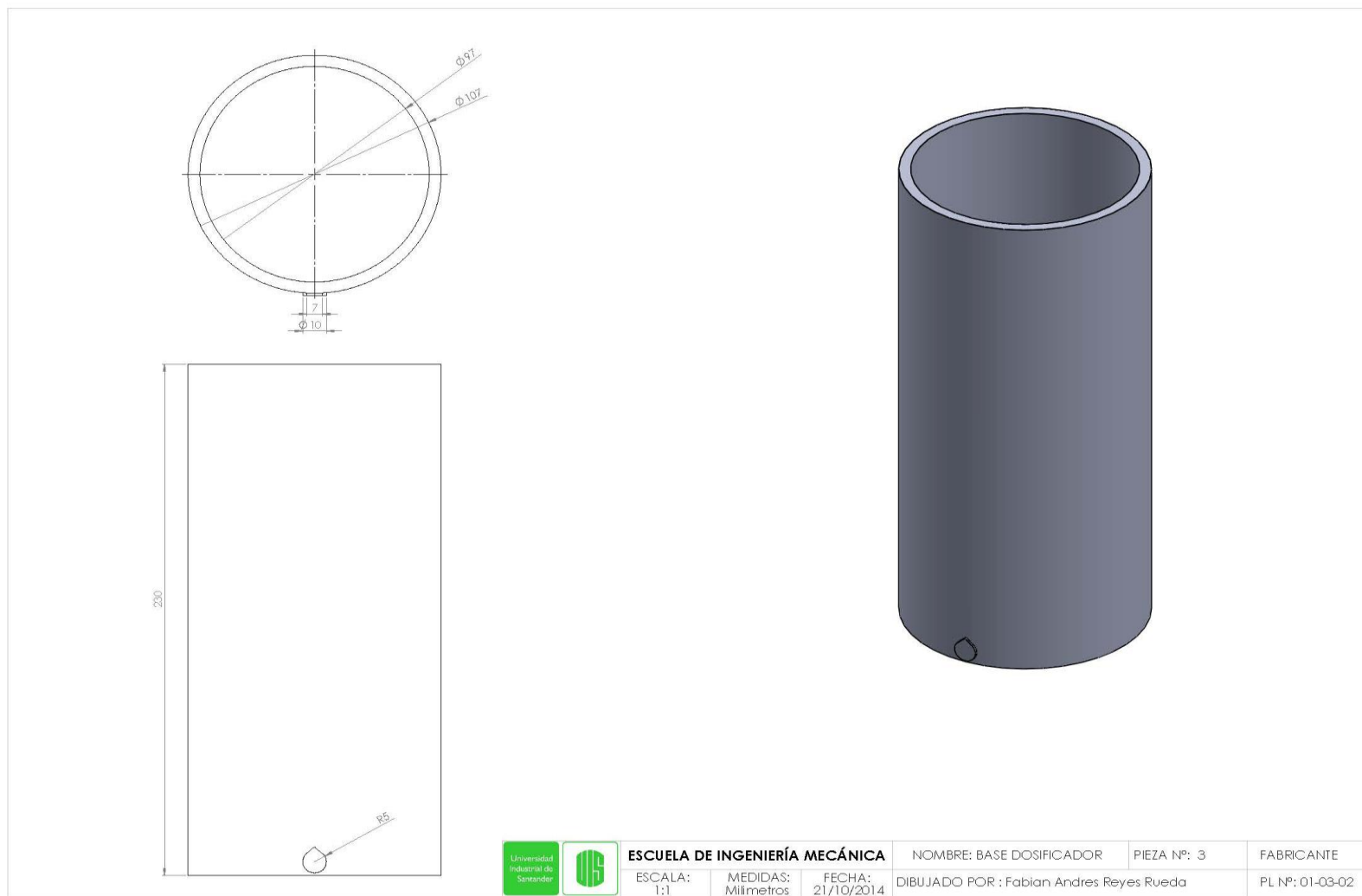
ESCALA:
1:1

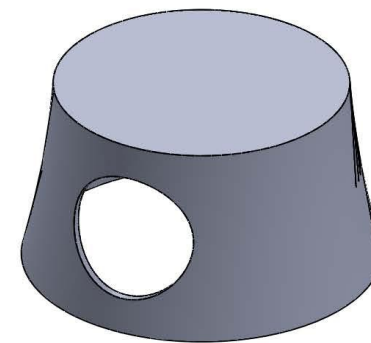
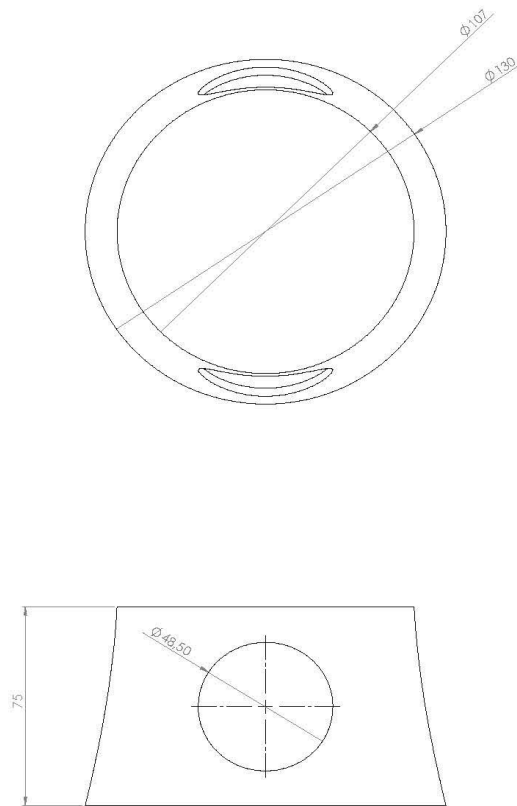
MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL Nº: 01-03-01





ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA:
1:1

MEDIDAS:
Milímetros

FECHA:
21/10/2014

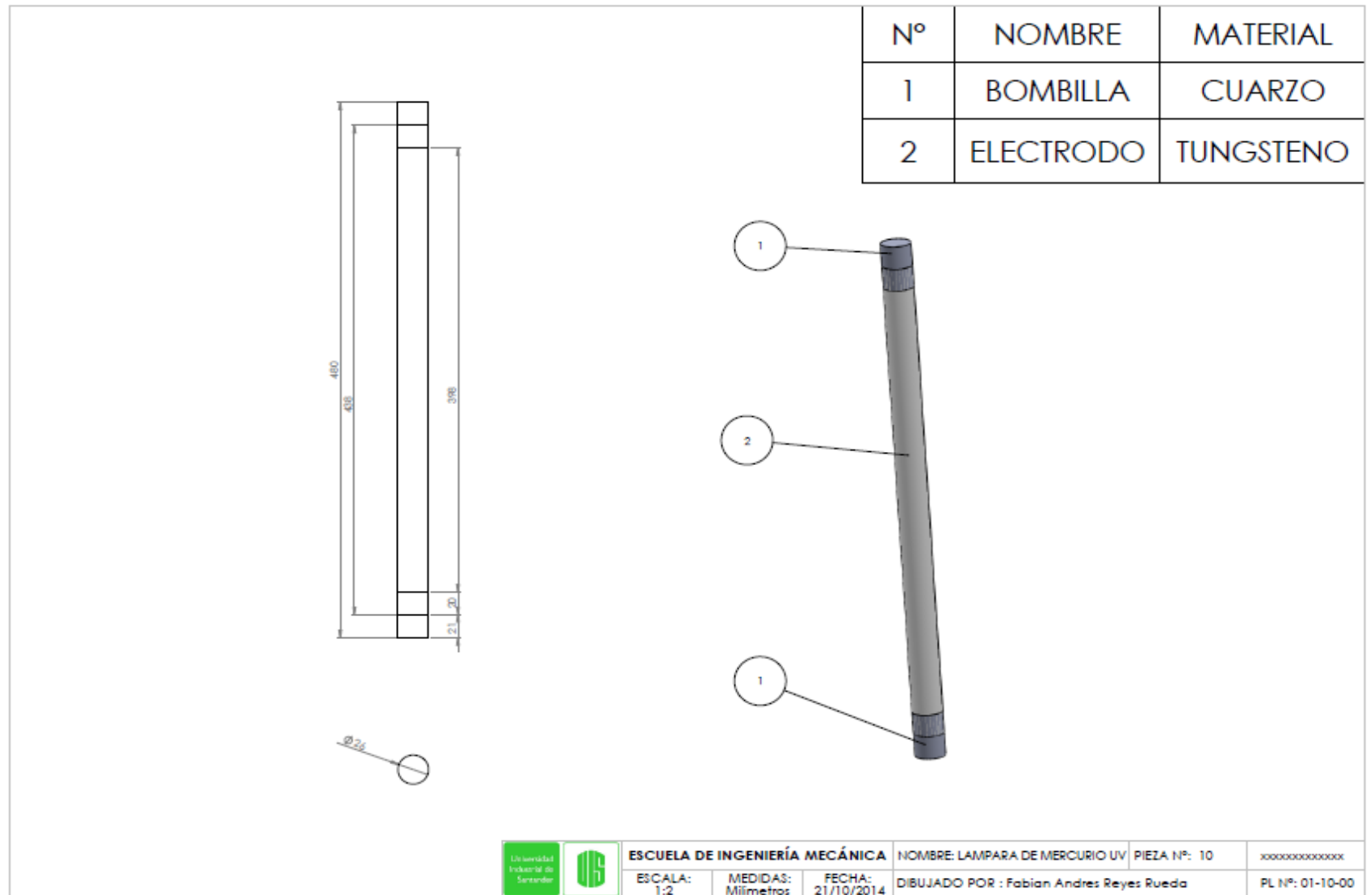
NOMBRE: APOYO DOSIFICADOR

PIEZA Nº: 3

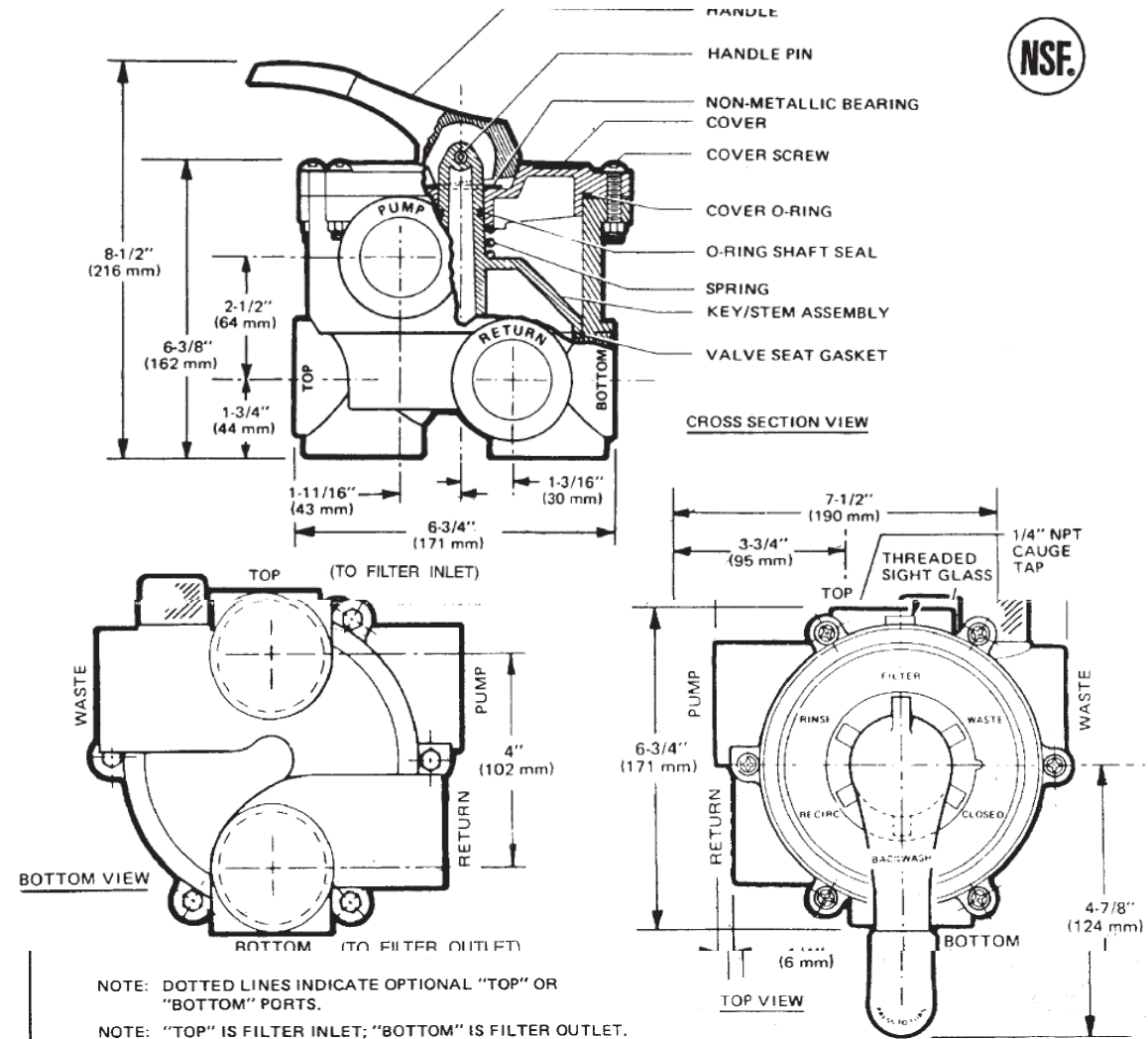
FABRICANTE

DIBUJADO POR : Fabian Andres Reyes Rueda

PL Nº: 01-03-03



PLANO VÁLVULA MULTIPORT



ANEXO B. Resultados de laboratorio Labalime



IDENTIFICACION DE LA MUESTRA

Muestra No	30996
Muestra	AGUA DE LAGO SUPERFICIE
Empresa	FABIÁN ANDRÉS REYES
Fecha de recepción (año-mes-día)	2014-09-03 00:00:00
Objeto del Análisis	Control de calidad microbiológica
Lugar de Recolección	Trafal al laboratorio
Responsable del Muestreo	El solicitante

RESULTADOS

PARAMETRO	RESULTADO	LIM INFE.	LIM SUPE.	UNIDAD	TECNICA
Bacterias mesofílicas	600	0	100	ufc/100 ml	Filtración por membr
Coliformes totales	300	0	0	ufc/100 ml	Filtración por membr
Coliformes fecales	100	0	0	ufc/100 ml	Filtración por membr

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTRA No.	30996
MUESTRA	AGUA DEL LAGO SUPERFICIE
SOLICITANTE	FABIÁN ANDRÉS REYES
FECHA DE LLEGADA	Septiembre 3 de 2014 HORA: 14:30
OBJETO DEL ANÁLISIS	Control de calidad fisicoquímica
LUGAR DE RECOLECCIÓN	TRAÍDA AL LABORATORIO
RESPONSABLE DEL MUESTREO	El solicitante

RESULTADOS

PARAMETRO	RESULTADO	*LIM. PERM.	UNIDADES	TÉCNICA
pH	6.49	6.5-9.0	----	St. Mth. 4500 H+B
COLOR	483	Máx. 15	UPC	HACH 120
TURBIEDAD	35.7	2	NTU	St. Mth. 2130 B
CONDUCTIVIDAD	90.5	50-1000	Us/cm	St. Mth. 2510 B
COLOR RESIDUAL	--	0.3-2.0	mg/L Cl ₂	St. Mth. 4500 Cl G
ALCALINIDAD P	0	---	mg/L CaCO ₃	St. Mth. 2320 B
ALCALINIDAD TOTAL	9	Máx. 200	mg/L CaCO ₃	St. Mth. 2320 B
DUREZA TOTAL	27	300	mg/L CaCO ₃	St. Mth. 2340 C

*Límites permitidos según Resolución 2115 del 22 de junio/07 para Agua Potable

ND: No detectable "Válido únicamente para la muestra analizada"

IDENTIFICACION DE LA MUESTRA

Muestra No	32575
Muestra	AGUA TRATADA
Empresa	FABIÁN ANDRÉS REYES
Fecha de recepción (año-mes-día)	2014-10-30 18:15:00
Objeto del Análisis	Control de calidad microbiológica
Lugar de Recolección	Tralda al laboratorio
Responsable del Muestreo	El solicitante

RESULTADOS

PARAMETRO	RESULTADO	LIM INFE.	LIM SUPE.	UNIDAD	TECNICA
Bacterias mesofílicas	59	0	100	ufc/100 ml	Filtración por membr
Coliformes totales	2	0	0	ufc/100 ml	Filtración por membr
Escherichia coli	0	0	0	ufc/100 ml	Filtración por membr

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

MUESTRA No.	32575
MUESTRA	AGUA TRATADA
SOLICITANTE	FABIÁN ANDRÉS REYES
FECHA DE LLEGADA	Octubre 30 de 2014 HORA: 18:15
OBJETO DEL ANÁLISIS	Control de calidad fisicoquímica
LUGAR DE RECOLECCIÓN	TRAÍDA AL LABORATORIO
RESPONSABLE DEL MUESTREO	El solicitante

RESULTADOS

PARAMETRO	RESULTADO	*LIM. PERM.	UNIDADES	TÉCNICA
pH	6.39	6.5-9.0	---	St. Mth. 4500 H+B
COLOR	5	Máx. 15	UPC	HACH 120
TURBIEDAD	2.07	2	NTU	St. Mth. 2130 B
CONDUCTIVIDAD	112.5	50-1000	Us/cm	St. Mth. 2510 B
CLORO RESIDUAL	N.D.	0.3-2.0	mg/L Cl ₂	St. Mth. 4500 Cl G
ALCALINIDAD P	0	---	mg/L CaCO ₃	St. Mth. 2320 B
ALCALINIDAD TOTAL	8	Máx. 200	mg/L CaCO ₃	St. Mth. 2320 B
DUREZA TOTAL	24	300	mg/L CaCO ₃	St. Mth. 2340 C

*Límites permitidos según Resolución 2115 del 22 de junio/07 para Agua Potable

ND: No detectable "Válido únicamente para la muestra analizada"

ANEXO C. Características de la bomba

Suministrado por el fabricante Pearl.



Pump Applications

The PEP series can be used to pump clean water without any abrasive particles or any other liquid with similar chemical and physical properties to water. The PEP series is recommended for small residential water supply applications, small irrigation systems, air conditioning units, and small boosting systems.

Aplicaciones de la bomba

Pueden ser usadas para bombear agua limpia u otros líquidos similares al agua en propiedades físicas y químicas sin partículas abrasivas. Recomendadas para suministro de agua a pequeñas unidades residenciales, pequeños sistemas de riego, sistemas de aire acondicionado, pequeños sistemas hidroneumáticos.

WATER PUMP
Cast iron pump body
Motor Bracket with antilock system which prevents the pump from blocking after long periods of no usage
Brass peripheral vane impeller
Motor shaft in stainless steel AISI 304
Maximum liquid temperature of 60 °F
Maximum suction lift of 26 feet
Mechanical seal in ceramic and graphite, with elastomer in NBR
MOTOR
Close-coupled TEFC motor with copper windings
Insulation Class F
IP 44 protection
Maximum environment temperature of 40 °C
Single phase, 60 Hz, 3450 rpm with thermal overload protection available in 110 V, 110/220 V, or 220 V
Three phase, 60 Hz, 3450 rpm available in 220/440 V
50 Hz or other voltages available upon special request

BOMBA
Cuerpo de bomba en hierro fundido
Soporte motor con sistema antibloqueo, que evita que la bomba se bloquee después de largos periodos de no funcionamiento
Impulsor en BRONCE de alabes radiales
Eje en acero inoxidable AISI 304
Máxima temperatura del líquido: 60 °C
Capacidad de succión a nivel del mar: 8 m
Sello mecánico en cerámica y grafito, con elastómero en NBR
MOTOR
Motor de inducción cerrado con bobinado en cobre
Aislamiento clase F
Protección IP 44
Temperatura máxima de ambiente: 40 °C
Monofásico 110 V - 110/220 V - 220 V según requisición. 60 Hz, 3450 rpm. Incluye protector térmico interno en el embobinado
Trifásico 60 Hz, 3450 rpm. 220/440 V
Disponibles en versiones a 50 Hz

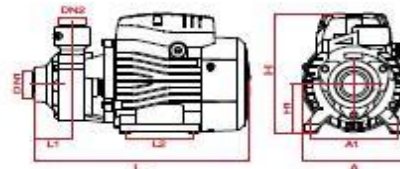


Double Insert / Tecnología Antibloqueo
Stainless Steel / Doble Inserto en
Antilock technology / Acero inoxidable



Pump dimensions / Dimensiones de la bomba

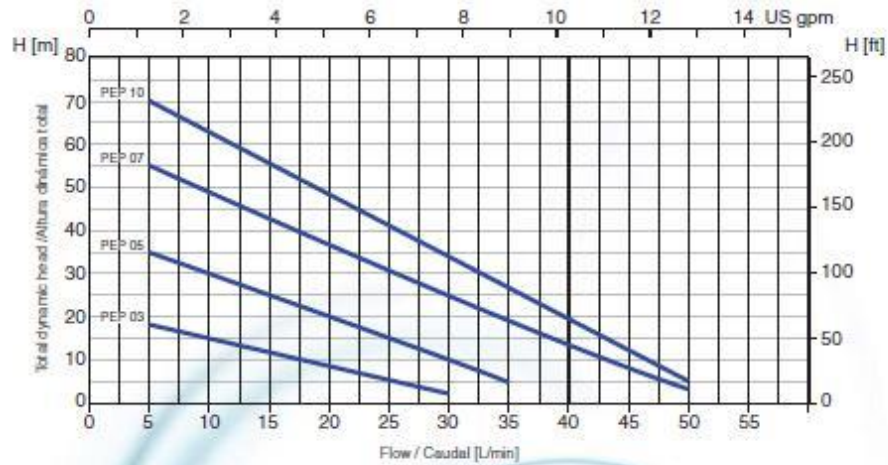
MODEL MODELO	DN1	DN2	DIMENSIONS / DIMENSIONES							
			L [mm]	A [mm]	H [mm]	L1 [mm]	A1 [mm]	H1 [mm]	L2 [mm]	
PEP 43	1"	1"	225	132	155	39.5	100	63	80	
PEP 65	1"	1"	250	132	155	46.5	100	63	80	
PEP 87	1"	1"	282	147	183	51	112	71	90	
PEP 10	1"	1"	300	147	183	54.5	112	71	90	



Above Ground Pumps | Bombas de Superficie

PEP Series | Serie PEP

Curve and Performance Data / Curva de Prestaciones Hidráulicas



Performance Data / Datos de Prestaciones Hidráulicas

MODEL MODELO	POWER POTENCIA		FLOW / CAUDAL											
	kW	HP	m³/hr @	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	
			l/min @	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	
TOTAL MANOMETRIC HEIGHT IN METERS / ALTURA MANOMÉTRICA TOTAL EN METROS														
PEP 03	0.25	0.33	20	18	15	12	8	6	2					
PEP 05	0.37	0.5	40	35	30	25	20	15	10	5				
PEP 07	0.6	0.8	60	55	48	43	37	33	27	21	16	8		
PEP 10	0.75	1.0	75	70	63	55	48	42	34	27	20	5		

Packaging Information / Información del Empaque

MODEL MODELO	DIMENSIONS DIMENSIONES			WEIGHT PESOS
	L [mm]	A [mm]	H [mm]	
PEP 03	248	158	174	5
PEP 05	268	140	165	5
PEP 07	325	185	210	9
PEP 10	345	180	210	11



ANEXO D. Propiedades del perfil estructura⁴⁸

MECÁNICAS

Esfuerzo de Tracción, LW	D638	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	20,000 138	20,000 138	20,000 138	20,000 138	20,000 138
Esfuerzo de Tracción, CW	D638	psi N/mm ²	7,000 48.3	7,000 48.3	7,500 51.7	10,000 68.9	10,000 68.9	7,500 51.7	10,000 68.9
Módulo de Tracción, LW	D638	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	2.5 17.2	2.6 17.9	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4
Módulo de Tracción, CW	D638	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	0.8 5.52	0.8 5.52	0.7 4.83	0.9 6.21	1.0 6.89	1.0 6.89	1.0 6.89
Esfuerzo de Compresión, LW	D695	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165
Esfuerzo de Compresión, CW	D695	psi N/mm ²	15,000 103	16,000 110	15,500 107	16,500 114	20,000 138	16,500 114	17,500 121
Módulo de Compresión, LW	D695	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	2.5 17.2	2.6 17.9	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4	1.8 12.4
Módulo de Compresión, CW	D695	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	0.8 5.52	0.8 5.52	0.7 4.83	0.9 6.21	1.0 6.89	1.0 6.89	1.0 6.89
Esfuerzo de Flexión, LW	D790	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165	24,000 165
Esfuerzo de Flexión, CW	D790	psi N/mm ²	10,000 68.9	10,000 68.9	10,000 68.9	13,000 89.6	17,000 117	10,000 68.9	13,000 89.6
Módulo de Flexión, LW	D790	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	1.6 11.0	1.6 11.0	1.1 7.58	1.1 7.58	1.4 6.65	1.1 7.58	1.1 7.58
Módulo de Flexión, CW	D790	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	0.8 5.52	0.8 5.52	0.8 5.52	0.8 5.52	1.3 8.95	0.8 5.52	0.8 5.52
Módulo de Elasticidad ^①	sección completa	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	2.6 17.9	2.8 19.3					
Módulo de Elasticidad: Perfiles W & I > 4"	sección completa	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	2.5 17.2	2.5 17.2					
	Perfiles W & I > 102 mm								
Módulo de Cizallamiento, LW ^{②③}	—	10 ⁶ psi 10 ⁶ N/mm ²	0.425 2.93	0.425 2.93					
Esfuerzo Cortante de Viga Corta, LW ^{②③}	D2344	psi N/mm ²	4,500 31.0	4,500 31.0					
Tensión de Apoyo, LW	D953	psi N/mm ²	30,000 207	30,000 207	32,000 220.6	32,000 221	32,000 221	32,000 221	32,000 221
Coefficiente de Poisson, LW ^④	D3039	in/in mm/mm	0.33 0.330	0.33 0.330	0.31 0.310	0.31 0.310	0.31 0.310	0.32 0.320	0.32 0.320
Impacto Izod, LW	D256	ft-lbs/in J/mm	25 1.33	25 1.33	15 0.801	10 0.533	10 0.533	15 0.801	10 0.533
Impacto Izod, CW	D256	ft-lbs/in J/mm	4 0.214	4 0.214	5 0.267	5 0.267	5 0.267	5 0.267	5 0.267

FÍSICAS

Dureza Barcol	D2583	—	45 ^⑤	45 ^⑤	40	40	40	40	40
Absorción de Agua (24 horas) ^⑥	D570	% Max	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Densidad	D792	lbs/in ³ 10 ⁻³ g/mm ³	0.062-0.070 1.72-1.94	0.062-0.070 1.72-1.94	0.060-0.068 1.66-1.88	0.060-0.068 1.66-1.88	0.060-0.068 1.66-1.88	0.060-0.068 1.66-1.88	0.060-0.068 1.66-1.88
Coefficiente de Expansión Térmica, LW ^⑦	D696	10 ⁻⁶ in/in/°F 10 ⁻⁶ mm/mm/°C	7 1.2	7 1.2	8 1.45	8 1.45	8 1.45	8 1.45	8 1.45
Conductividad Térmica ^⑧	C177	BTU-in/ft ² h/°F w/(m ² *K)	4 0.58	4 0.58					

⁴⁸ Fabricante EXTREN PERFILES Y CHAPAS ESTRUCTURALES DE FIBRA DE VIDRIO