**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

*“Diseño de una Planta Portátil Potabilizadora de Agua de 50 Metros Cúbicos por Día”*

**TESIS DE GRADO**

Previo la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

José Javier Estrada Torres

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año 2011

**AGRADECIMIENTO**

A todas las personas que de uno u otro modo colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Ernesto Martínez Director de Tesis por su invaluable ayuda.

**DEDICATORIA**

A mis padres, Oscar Estrada y María Torres por su gran apoyo, comprensión y paciencia.

**TRIBUNAL DE GRADUACIÓN**

 Ing. Gustavo Guerrero M. Ing. Ernesto Martínez L.

 DECANO DE LA FIMCP DIRECTOR DE TESIS

 PRESIDENTE

Ing. Mario Patiño A.

 VOCAL

**DECLARACIÓN EXPRESA**

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

José Javier Estrada Torres

**RESUMEN**

En situaciones de desastres naturales, como inundaciones, el suministro de agua potable se ve afectado, lo que representa un riesgo para la salud de las personas que requieren el líquido vital, el mismo que debe ser restablecido lo más pronto posible. Para este propósito se diseñó una planta potabilizadora portátil que puede ser trasladada con facilidad y de manera inmediata, mediante el uso de un remolque y un vehículo mediano.

El caudal de la planta es de 50 m3/día, la cual puede entregar agua potable a aproximadamente 3000 personas con un dotación de 15 litros por persona, que es lo mínimo que se requiere en casos de emergencia.

Los procesos que se realizan para la potabilización del agua son:

* Coagulación
* Desinfección
* Floculación
* Sedimentación
* Filtración

Para la captación de agua cruda a ser potabilizada se seleccionó una bomba centrifuga marca Goulds, modelo GT-07 de 3/4 HP que a un caudal de 50 m3/día tiene un cabezal de succión de 7.62 metros.

La coagulación consiste en anulación de las cargas eléctricas de las partículas suspendidas en el agua, para que estas se agrupen alrededor del coagulante formando grumos o partículas de mayor tamaño, las mismas que posteriormente serán eliminadas en la sedimentación.

Se determinó mediante una prueba de jarras que el mejor reactivo para realizar la coagulación era el Policloruro de Aluminio (PAC) ya que con una menor cantidad se logra obtener una menor turbidez del agua a tratar, con una dosis 15mg/l.

La Desinfección se realiza mediante el uso de hipoclorito de sodio (NaOCl) diluido al 10 por ciento, llamado comúnmente cloro, el mismo que es capaz de eliminar hasta el 99.7% de las bacterias, es de bajo costo y deja un efecto de cloro residual, el mismo debe estar entre 0.3 y 1.5mg/l a la salida de la planta.

La Coagulación y la Desinfección se realizan utilizando bombas dosificadoras electromagnéticas a diafragma, las mismas que introducen los químicos en la tubería de ingreso del agua cruda a la planta.

Luego de realizada la coagulación se realiza la floculación, la cual consiste en la agitación lenta del agua, para que permita que las partículas que se formaron por efectos de la coagulación puedan seguir aumentando de tamaño y se sedimenten con mayor facilidad. Para realizar dicho proceso, se diseñó un floculador hidráulico de pantallas, donde el agua realiza un movimiento de vaivén contorneando las diversas pantallas.

Una vez realizada la mezcla lenta, el fluido está listo para la sedimentación, para lo cual se utiliza un módulo de placas inclinadas 60 grados con respecto a la horizontal, lo cual proporciona un espacio muy reducido, hasta un 90% menos con respecto a los sedimentadores convencionales, esto hace que sea económico, compacto y eficiente.

Para dimensionar el sedimentador el principal parámetro es la velocidad de sedimentación de las partículas, la cual es obtenida mediante una prueba de jarras.

Las partículas que son retenidas en el sedimentador, caen a una tolva de lodos, donde se acumulan para luego ser eliminados periódicamente.

Posterior a la sedimentación el agua llega a un cárcamo de bombeo donde mediante el uso de una bomba centrífuga es llevada hacia el filtro de arena y carbón activado que ayudan a eliminar partículas que por su tamaño no han podido ser eliminadas por el sedimentador, también elimina olores, sabores y compuestos orgánicos.

Para la filtración se utilizan tanques a presión, lo cual hace que puedan trabajar a una mayor velocidad de filtración y ocupen un menor espacio.

La velocidad de filtración es el parámetro que determina el dimensionamiento de los filtros, en el caso del filtro de arena la velocidad de filtración es de 17.9 m/h y en el de carbón activado es 12 m/h.

Para alimentar los filtros se seleccionó una bomba centrífuga marca Goulds, modelo LB de 3/4HP, que a un caudal de trabajo de 50m3/día tiene una carga dinámica total de 37.8 metros, lo cual permite vencer las perdidas generadas por las conexiones y filtros que equivalen a 12.98 metros y dejar un excedente para poder llevar el agua potabilizada a algún reservorio o tanque elevado.

Las partes y equipos por su diseño reducido y compacto pudieron ser ubicadas en una estructura soportante de 1.5 metros de ancho por 2.5 metros de largo y 1.55 metros de alto. La planta completa se monta sobre un remolque para su fácil transportación.

**ÍNDICE GENERAL**

**Pág.**

RESUMEN.……………………….……………………………………………….. I

ÍNDICE GENERAL ………………………….…………………………………… V

ABREVIATURAS …………………………..………………………….……….. VIII

SIMBOLOGÍA ……………………………..…………………………………….. IX

ÍNDICE DE FIGURAS ………………………..………………………………... XIII

ÍNDICE DE TABLAS ………………………….………………………………... XIV

ÍNDICE DE PLANOS… ………………..…………………………………….... XVI

INTRODUCCIÓN ……………..…………………………………………………… 1

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS…………………………………………….….. 3
	1. Definición del Problema ...……………………………………………….3
	2. El Agua y su Calidad para Consumo Humano .…...…..………….…. 4
	3. Proceso de Potabilización ….......…….…………………………….…... 7
	4. Guías y Normas……...………...………………………………………....28

CAPÍTULO 2

1. DISEÑO DE LA PLANTA …………………..………………….………..……35
	1. Requerimientos del Diseño...……………………………….………..…36
	2. Limitaciones del Diseño……………...…………………....….…..…….38
	3. Análisis de la Fuente de Agua ………….....……………………..……39

2.3.1. Características de la Fuente de Agua………………..………....39

2.3.2. Prueba de Jarras………………………………………………..…40

* 1. Diseño de Forma ……………………………………………………...... 50
	2. Diseño de la Planta……………...…….……………………………....…52

2.5.1. Coagulación y Floculación………………………………..………52

2.5.2. Desinfección…………………………………………………….…66

2.5.3. Sedimentación……………………………………….………….…69

2.5.4. Filtración………………………………………………….………...82

 2.5.4.1. Filtro de Arena….………………………………..…….…82

 2.5.4.2. Filtro de Carbón Activado ...………………………….…88

* 1. Selección de Equipos …………………………………………......….…90

2.6.1. Bombas………………………………………….……………….…90

2.6.2. Generador Eléctrico…………………………………………...…104

2.6.3. Sistema de Almacenamiento……………………………….…..108

* 1. Diseño de Estructura Soportante de la Planta……………..……….111

CAPÍTULO 3

1. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO…..………………..…………….…….113
	1. Operación y Control……… ……………………..……………........…..113
	2. Manejo de Reactivos…………………………….……………….…..…132
	3. Mantenimiento de la Planta.……………………………………………133

CAPÍTULO 4

1. COSTOS …………..………………………..………………………………..143
	1. Cronograma de Fabricación…...…………....………………….……..143
	2. Análisis de Costos………...…………………....……………….…….. 144

CAPÍTULO 5

1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES …………………………...152

5.1. Conclusiones…………………………………………………………..152

5.2. Recomendaciones…………………………………………………….154

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

**ABREVIATURAS**

PAC Policloruro de Aluminio

INEN Instituto Ecuatoriano de Normalización

pH Potencial de Hidrógeno

NTU Unidades Nefelométricas de Turbidez

STD Sólidos Totales Disueltos

ppm Partes por millón

PVC Policloruro de Vinilo

CAP Carbón Activado en Polvo

CAG Carbón Activado Granular

OMS Organización Mundial de la Salud

AISI American Iron and Steel Institute

NPT National Pipe Thread Taper

HP Horse Power

gpm Galones por minuto

Hz Hertz

CTD Carga Dinámica Total

PTFE Politetrafluoroetileno

UV Rayos Ultra Violeta

DN Diámetro Nominal

**SIMBOLOGÍA**

Q Caudal de Agua a ser tratado por la Planta

ρ Densidad

QD Caudal de la Solución de PAC a dosificar

ST Solución de trabajo

QT Caudal de trabajo de la bomba dosificadora

QN  Caudal nominal de la bomba dosificadora.

%f Porcentaje a regular en la frecuencia de la bomba dosificadora

Vc Velocidad de los chorros de coagulante

Va Velocidad del agua en la tubería de ingreso

Rc Relación entre Vc y Va

dt Diámetro de la tubería de ingreso a la planta

di Diámetro del orificio del inyector 1era y 2da hilera.

Va Velocidad del agua en la tubería de ingreso a la planta

Ast Área de la sección de la tubería de ingreso

Xs1 Diámetro cubierto por los chorros de la primera hilera

Xs2  Diámetro cubierto por los chorros de la 2da hilera

dX1 Diámetro del chorro producido por un orificio de la primera hilera

dX2  Diámetro del chorro producido por un orificio de la segunda hilera

A1 Área cubierta por los chorros de la primera hilera

A2 Área cubierta por los chorros de segunda hilera

Z1 Longitud que alcanzan los chorros de la primera hilera

Z2 Longitud que alcanzan los chorros de la segunda hilera

Ac  El área total cubierta por los chorros de coagulante

Ptc Porcentaje de la sección de la tubería de ingreso cubierta por los chorros del inyector

qc Caudal del Coagulante inyectado

ho Pérdida de carga a la salida de los orificios del inyector

K Coeficiente de pérdida de carga de los orificios del inyector

g Aceleración de la gravedad= 9.8 m/s2

Gc Gradiente de velocidad del coagulante

G Gradiente de velocidad

$h\_{f}$ Pérdida total de carga

$T\_{r}$ Tiempo de retención

h1 Pérdidas debidas a la fricción en los canales

h2  Pérdidas debidas a los cambios de dirección en las vueltas

$L\_{c}$ Longitud de los canales

n Coeficiente de rugosidad de Manning

$V\_{flo}$ Velocidad de flujo en los canales formados por las pantallas

$R\_{h}$ Radio hidráulico

Nv Número de vueltas o pasos entre canales

Bf  Ancho de la unidad floculadora

Cp Distancia que traslapan las pantallas

Asc Área de la sección transversal de canal

Hc  Altura del canal

FS Factor de seguridad

Vs Velocidad de sedimentación obtenida de la prueba de jarras

θ Ángulo de inclinación de las placas con respecto a la horizontal

b Ancho de la placa

lp Longitud de la placa

e’ Espaciamiento horizontal entre una placa y otra.

e Espesor de la placa

S Módulo de eficiencia del sedimentador de placas

VSC Velocidad Crítica de Sedimentación

d Espaciamiento interior entre placas

lu Longitud útil dentro de las placas

L Longitud relativa del Módulo de Placas

AS Área superficial del sedimentador

f Constante trigonométrica de sedimentación

N Número de Canales formados por las placas

LT Longitud Total del Sedimentador

Vo Velocidad Media del Flujo

Re Número de Reynolds

Vo’ Velocidad Máxima del Flujo

Fd Frecuencia de descarga de los lodos

Vto Volumen de la tolva de lodos

Qlo Caudal de producción de lodos

Tlo Tasa de producción de lodos

hto  Altura de la tolva

At Ancho superior de la tolva

Bt Largo superior de la tolva

at Ancho inferior de la tolva

bt Largo inferior de la tolva

TVlo Tiempo de Vaciado del lodo

qdlo Caudal de descarga de lodos

Cc Coeficiente de contracción de lodos

Aod Área del orificio de descarga de lodos (m2)

ha Altura del nivel del agua en el sedimentador

dod Diámetro del orificio de descarga de lodos

lv Longitud del vertedero de recolección de agua

$q\_{v}$ Tasa de Diseño de los Vertedero

hps Profundidad de Ubicación de la Unidad Sedimentadora

$d\_{v}$ Distancia de separación entre vertederos

Ves Velocidad ascensional del agua

do Diámetro de los Orificios

No Número de orificio de cada tubo recolector

dc Diámetro del tubo recolector

dfa Diámetro del Filtro de Arena

dfc Diámetro del Filtro de Carbón Activado

$A\_{fc} $ Área de la sección transversal del filtro de carbón activado

$A\_{fa} $ Área de la sección transversal del filtro de arena

hce Altura de la cámara de expansión

hutil Altura útil del filtro

hmf Altura del medio filtrante

Z Desnivel entre entrada del fluido y salida

$H\_{f}$ Pérdidas por fricción

$H\_{s}$ Pérdidas menores (codos, tee, válvulas, etc.)

$H\_{tf}$ Pérdida en los filtros

J Pérdidas de carga por cada metro de tubería

L Longitud de la cañería de conducción

v Velocidad de circulación del agua (m/s)

$K\_{c}$ Coeficiente de pérdida para codos de 90 grados de radio corto

$K\_{t}$ Coeficiente de pérdida tee

$K\_{v}$ Coeficiente de pérdida para válvulas de globo

$K\_{n}$ Coeficiente de pérdida para nudos

$N\_{c}$ Número de codos de 90grados de radio corto

$N\_{t}$ Número de tee

$N\_{v}$ Número de válvulas de globo

$N\_{n}$ Número nudos

v Velocidad de circulación del agua

$d\_{tf}$ Diámetro interior de la tubería para los filtros

Vfa Velocidad de Filtración del filtro de arena

Vfc Velocidad de Filtración del filtro de carbón activado

ν Viscosidad del agua

Vcm Volumen de la zona de mezcla

ρ Densidad del agua

Tm Tiempo de Mezcla

av Espaciamiento entre el extremo de la pantalla y la pared del tanque

ep Espaciamiento entre pantallas o ancho del canal

π Pi= 3.1415…

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**Pág.**

Figura 1.1. Equipo para Prueba de Jarra………………………………………14

Figura 1.2. Mezclador hidráulico (inyectores)….………………………………16

Figura 1.3. Comportamiento de los chorros con el uso de inyectores ……. 17

Figura 1.4. Floculadores hidráulicos de pantallas……………………….……20

Figura 2.1. Equipo para prueba de jarra………………………………….……42

Figura 2.2. Diseño de forma de planta potabilizadora…………………….…..52

Figura 2.3. Dimensiones de tolva de lodos………………………………….....76

Figura 2.4. Grava…………………………………………………………………..87

Figura 2.5. Arena sílice………………………………………………………....88

Figura 2.6. Dimensiones de la bomba de captación de agua cruda…………92

Figura 2.7. Curva de rendimiento de la bomba captación de agua cruda.....93

Figura 2.8. Curva de rendimiento de la bomba para los filtros…………….....97

Figura 2.9. Dimensiones de la bomba para los filtros…………………….......98

Figura 2.10. Especificaciones y dimensiones de la bomba dosificadora.....101

Figura 2.11. Nomenclatura para especificar la bomba dosificadora……….102

Figura 2.12. Montaje de bomba dosificadora de químicos…………………..104

Figura 2.13. Generador eléctrico……………………………………………….108

Figura 2.14. Tanque de almacenamiento……………………………….…….109

Figura 3.1. Proceso de potabilización……………………………………..….114

Figura 3.2. Interruptor de nivel tipo flotador……………………………….....118

Figura 3.3. Filtros en funcionamiento ………………………………………...121

Figura 3.4. Puesta en marcha del filtro de arena………………………….…122

Figura 3.5. Retrolavado del filtro de arena……………………………………124

Figura 3.6. Puesta en marcha del filtro de carbón activado………………...125

Figura 3.7. Retrolavado del filtro de carbón activado…………………….….127

**ÍNDICE DE TABLAS**

**Pág.**

Tabla 1 Clasificación de procesos de tratamiento del agua en

función de su complejidad y costo………………………….……..8

Tabla 2 Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1108 agua potable…...31

Tabla 3 Requisitos microbiológicos del agua NTE INEN 1108………...34

Tabla 4 Valores promedio de las características del agua a tratar…….41

Tabla 5 Dosis de coagulante a añadir en cada jarra……………….…....43

Tabla 6 Datos y parámetros para el ensayo de jarras nº1………….…..45

Tabla 7 Variación de la turbidez en función de la dosis de

sulfato de aluminio…………………………………………….…...45

Tabla 8 Variación de la turbidez en función de la dosis de

policloruro de aluminio………………………………………….....46

Tabla 9 Datos y parámetros para el ensayo de jarras nº2………..…….46

Tabla 10 Variación de la turbidez en función de la dosis

de sulfato de aluminio……………………………….………….....47

Tabla 11 Variación de la turbidez en función de la dosis de

 policloruro de aluminio……………………………………….......47

Tabla 12 Datos y parámetros para el ensayo de jarras…………………..48

Tabla 13 Variación de la turbidez en función de la dosis

de sulfato de aluminio…………………………………..…….…..48

Tabla 14 Variación de la turbidez en función de la dosis de

policloruro de aluminio……………………………………...……..49

Tabla 15 Dosificación óptima de cada coagulante……………….……....49

Tabla 16 Carga superficial…………………………………….……….….....70

Tabla 17 Módulo de eficiencia de sedimentadores……….…………........75

Tabla 18 Medio filtrante - filtro de arena……………………………….…...87

Tabla 19 Características del filtro de arena……………………………..…87

Tabla 20 Medio filtrante - filtro de carbón activado………………………..89

Tabla 21 Características del filtro de carbón activado………………….90

Tabla 22 Consumo energético de los equipos…………………………...105

Tabla 23 Características del tanque de almacenamiento……………….111

Tabla 24 Problemas y soluciones durante la operación de la planta….130

Tabla 25 Costos de fabricación de la planta……………………………...145

Tabla 26 Costos de operación de la planta……………………………….150

Tabla 26 Costos total de producción de la planta………………………..151

**ÍNDICE DE PLANOS**

Plano 1 Isométrico de la Planta

Plano 2 Medidas Generales de la Planta

Plano 3 Tanque de Sedimentación y Floculación

Plano 4 Montaje de Filtros

Plano 5 Filtro de Arena

Plano 6 Filtro de Carbón Activado

Plano 7 Módulo de Floculación

Plano 8 Placas Inclinadas

Plano 9 Estructura Soportante