

**DESARROLLO DE SOFTWARE PARA DISEÑO Y DIBUJO  
DE UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO**



**Pablo Andrés Andrade Casanova**

**Universidad del Cauca**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria**

**Popayán, octubre de 2011**

**DESARROLLO DE SOFTWARE PARA DISEÑO Y DIBUJO  
DE UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN DE FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO**



**Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de  
Ingeniero Civil**

**Pablo Andrés Andrade C.**

**Directores:**

**Ing. Guillermo Chaux Figueroa**

**Ing. Diego Fernando Martínez Cabanillas**

**Universidad del Cauca**

**Facultad de Ingeniería Civil**

**Departamento de Ingeniería Ambiental y Sanitaria**

**Popayán, octubre de 2011**

Nota de aceptación: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Firma del Presidente del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma del Jurado

Popayán, octubre de 2011

A Raúl Andrade y Marta Casanova,  
por su esfuerzo y sacrificio.

## **AGRADECIMIENTOS**

Principalmente quiero agradecerle a Dios por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Agradezco hoy y siempre a mi familia porque a pesar de no estar presente físicamente, sé que procuraron mi bienestar desde lejos, y está claro que si no fuese por el esfuerzo realizado por ellos, no hubiese sido posible concluir mis estudios.

Agradecer a todos mis compañeros de estudio que me ayudaron con sus oportunos consejos y su incondicional apoyo.

Agradezco a los ingenieros Efraín Solano, Guillermo Chaux y Diego Martínez por su interés y acompañamiento.

Y por último agradezco a la Universidad del Cauca por formarme como profesional.

## RESUMEN

El presente proyecto plantea el desarrollo de un software para el diseño y dibujo de plantas de potabilización de agua potable convencionales con funcionamiento hidráulico, a partir de datos suministrados por el usuario, tales como: caudal y temperatura del agua, con los cuales se pretende diseñar cada uno de los sistemas hidráulicos que conforman la planta, este prototipo computacional fue implementado en Visual Basic 6.0, un lenguaje de programación dirigido por eventos.

La metodología empleada para la estructuración del software se basa en la elaboración de algoritmos secuenciales que permitan calcular eficientemente, a partir del ingreso de datos, cada uno de los sistemas hidráulicos, entre los cuales están: mezcladores rápidos (cámara de aquietamiento, canaleta Parshall), mezcladores lentos (floculadores horizontales y verticales), sedimentadores de alta tasa y filtros autolavantes.

Los resultados que se pueden obtener en cada uno de los sistemas hidráulicos anteriormente mencionados, una vez ingresados los datos solicitados, pueden ser visualizados a través de memorias de cálculos representadas en archivos de texto plano junto con los planos en planta en formato .dxf propio de AutoCAD.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>II</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>1. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 OBJETIVO GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>3</b>
<b>3. CONCEPTOS PRELIMINARES .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA .....</b>	<b>4</b>
3.1.1. Características físicas .....	4
3.1.2. Características químicas .....	4
3.1.3. Características microbiológicas.....	6
<b>4. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN .....</b>	<b>7</b>
<b>4.1. MEZCLADORES HIDRÁULICOS RÁPIDOS .....</b>	<b>8</b>
4.1.1. Mezclador rápido con vertedero rectangular .....	8
4.1.1.1. Parámetros de diseño para el mezclador rápido con vertedero rectangular.....	9
4.1.2. Mezclador rápido con canaleta Parshall.....	12
4.1.2.1. Parámetros de diseño para la canaleta Parshall .....	13
<b>4.2. MEZCLADORES HIDRÁULICOS LENTOS .....</b>	<b>17</b>
4.2.1. Mezclador hidráulico lento de flujo horizontal.....	17
4.2.1.1. Parámetros de diseño para el floculador hidráulico de flujo horizontal.....	18
4.2.2. Mezclador hidráulico lento de flujo vertical.....	21
4.2.2.1. Parámetros de diseño para el floculador hidráulico de flujo vertical .....	22
<b>4.3 SEDIMENTADOR DE ALTA TASA.....</b>	<b>25</b>
4.3.1. Parámetros de diseño para el sedimentador de alta tasa .....	27
<b>4.4. FILTROS AUTOLAVANTES .....</b>	<b>31</b>
4.4.1. Parámetros de diseño para el filtro autolavante .....	32
<b>4.5. DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS .....</b>	<b>39</b>
4.5.1. Diagrama de flujo del mezclador rápido con vertedero rectangular .....	40

4.5.2. Diagrama de flujo para el dimensionamiento de la canaleta Parshall .....	42
4.5.3. Diagrama de flujo para el floculador hidráulico de flujo horizontal.....	44
4.5.4. Diagrama de flujo para el floculador hidráulico de flujo vertical.....	45
4.5.5. Diagrama de flujo para el sedimentador de alta tasa .....	46
4.5.6. Diagrama de flujo para el filtro autolavante .....	48
<b>5. ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA.....</b>	<b>51</b>
<b>5.1. DISEÑO GRÁFICO DE LAS VENTANAS DE LA APLICACIÓN .....</b>	<b>51</b>
<b>5.2. CÓDIGO IMPLEMENTADO EN LA APLICACIÓN.....</b>	<b>56</b>
5.2.1. Código utilizado en el cálculo de los sistemas hidráulicos .....	56
5.2.2. Código utilizado para la creación de planos en planta .....	58
5.2.3. Código utilizado para la creación memorias de cálculo.....	60
<b>5.3. UTILIDADES Y AYUDAS DE LA APLICACIÓN .....</b>	<b>61</b>
<b>6. CÁLCULOS ADICIONALES.....</b>	<b>63</b>
<b>6.1. SISTEMAS HIDRÁULICOS NO CALCULADOS.....</b>	<b>63</b>
<b>6.2. CÁLCULOS ADICIONALES POR PARTE DEL USUARIO .....</b>	<b>63</b>
<b>7. PRUEBAS Y RESULTADOS.....</b>	<b>65</b>
<b>7.1. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL MEZCLADOR RÁPIDO CON VERTEDERO RECTANGULAR. ....</b>	<b>65</b>
<b>7.2. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL MEZCLADOR RÁPIDO CON CANALETA PARSHALL .....</b>	<b>67</b>
<b>7.3. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO HORIZONTAL.....</b>	<b>68</b>
<b>7.4. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO VERTICAL .....</b>	<b>70</b>
<b>7.5. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA.....</b>	<b>72</b>
<b>7.6. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL FILTRO AUTOLAVANTE .....</b>	<b>73</b>
<b>8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>75</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características físicas del agua .....	4
Tabla 2. Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana. ....	5
Tabla 3. Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana .....	5
Tabla 4. Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana . ....	6
Tabla 5. Características microbiológicas.....	6
Tabla 6. Parámetros de diseño para el mezclador rápido con vertedero rectangular.....	9
Tabla 7. Ecuaciones para el cálculo del mezclador rápido con vertedero rectangular .....	10
Tabla 8. Parámetros para el diseño de la canaleta Parshall .....	13
Tabla 9. Características de descarga de canales Parshall .....	14
Tabla 10. Ecuaciones para el dimensionamiento de la canaleta Parshall .....	15
Tabla 11. Parámetros para el diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal .....	18
Tabla 12. Ecuaciones para el cálculo del floculador hidráulico de flujo horizontal.....	19
Tabla 13. Parámetros de diseño para el floculador hidráulico de flujo vertical .....	22
Tabla 14. Ecuaciones para el cálculo del floculador hidráulico de flujo vertical .....	23
Tabla 15. Parámetros de diseño para el sedimentador de alta tasa .....	27
Tabla 16. Ecuaciones para el cálculo del sedimentador de alta tasa.....	28
Tabla 17. Parámetros de diseño para el filtro autolavante .....	32
Tabla 18. Características para la arena y antracita.....	33
Tabla 19. Ecuaciones para el cálculo del filtro autolavante.....	34
Tabla 20. Expansión del lecho de arena .....	64
Tabla 21. Expansión del lecho de antracita .....	64

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistemas hidráulicos de una planta de tratamiento de agua convencional.....	7
Figura 2. Perfil del vertedero rectangular .....	9
Figura 3. Geometría de una canaleta Parshall .....	12
Figura 4. Floculador hidráulico de flujo horizontal.....	18
Figura 5. Floculador hidráulico de flujo vertical .....	21
Figura 6. Sección transversal de un sedimentador de alta tasa.....	25
Figura 7. Sección transversal de un filtro auto lavante.....	31
Figura 8. Ventana de inicio del software .....	51
Figura 9. Ventana del menú principal.....	52
Figura 10. Ventana del mezclador rápido con vertedero rectangular.....	53
Figura 11. Ventana del mezclador rápido con canaleta Parshall .....	53
Figura 12. Ventana del mezclador lento de flujo vertical.....	54
Figura 13. Ventana del mezclador lento de flujo vertical.....	54
Figura 14. Ventana del sedimentador de alta tasa.....	55
Figura 15. Ventana del filtro autolavante.....	55
Figura 16. Cuadros de ayuda al usuario .....	62
Figura 17. Textos de ayuda al usuario .....	62
Figura 18. Memoria de cálculo para el mezclador rápido con vertedero rectangular.....	65
Figura 19. Archivo DXF .....	66
Figura 20. Plano en planta para el mezclador rápido con vertedero rectangular.....	66
Figura 21. Memoria de cálculo para el mezclador rápido con canaleta Parshall .....	67
Figura 22. Plano en planta para el mezclador rápido con canaleta Parshall .....	68
Figura 23. Memoria de cálculo para el mezclador lento de flujo horizontal.....	69
Figura 24. Plano en planta para el mezclador lento de flujo horizontal.....	70
Figura 25. Memoria de cálculo para el mezclador lento de flujo vertical.....	71
Figura 26. Plano en planta para el mezclador lento de flujo vertical .....	71
Figura 27. Memoria de cálculo para el sedimentador de alta tasa.....	72
Figura 28. Plano en planta para el sedimentador de alta tasa .....	73
Figura 29. Memoria de cálculo para el filtro autolavante.....	74
Figura 30. Plano en planta para el filtro autolavante .....	74

## INTRODUCCIÓN

El agua pura, considerada como un compuesto químico producido por la unión de una molécula de oxígeno y dos de hidrógeno, solamente existe en el laboratorio bajo condiciones especiales. En la naturaleza, en cambio, el agua al entrar en contacto con el suelo y la atmósfera va adquiriendo elementos o compuestos que desvirtúan su composición original, tanto desde el punto de vista físico, esto es, que se hacen tangibles a la vista, gusto y al olfato, como desde el punto de vista químico y microbiológico, que requieren análisis específicos para comprobar su presencia; en estas condiciones, la calidad del agua se expresa mediante la concentración de estos elementos y compuestos ya sea en solución o en suspensión [1].

Actualmente, la población de los países en desarrollo experimenta la carencia de condiciones sanitarias adecuadas, incluyendo la de contar con agua potable que satisfaga sus condiciones básicas. La no disponibilidad de agua apta para el consumo humano plantea la necesidad de interesarse por proyectos innovadores en este campo [2], en este caso, dado que el tiempo empleado en el desarrollo de cálculos y dibujo de planos de una planta de tratamiento de agua potable convencional es considerablemente alto, se hace necesaria la utilización de programas de computadora que faciliten el diseño y ahorren tiempo. Por lo cual el presente trabajo pretende a través de algoritmos secuenciales desarrollar un *software* que calcule y dibuje la vista en planta de los diferentes elementos de un sistema de potabilización de agua con funcionamiento hidráulico.

Para llevar a cabo los objetivos de este proyecto se recurrió al uso de programas de computadora tales como Visual Basic 6.0, en el cual, a través de algoritmos secuenciales se estructuró cada uno de los sistemas hidráulicos (mezcladores rápidos, mezcladores lentos, floculadores, sedimentadores y filtros) que hacen parte de la planta de tratamiento de agua, obteniendo en cada uno de estos sistemas, archivos de texto con memorias de cálculo y planos en planta que podrán ser visualizados y editados (si se desea) en cualquier versión de AutoCAD.

La implementación de este software ayudará a disminuir costos de proyectos de plantas de potabilización de agua convencionales, en cuanto a que se presenta un ahorro de tiempo importante en la obtención de planos de diseño, y además, se podrán ensayar diferentes alternativas de diseño, lo cual generará una variedad de opciones en un mínimo de tiempo disminuyendo la posibilidad de implementar sistemas mal diseñados.

## 1. JUSTIFICACIÓN

Dado que el tiempo empleado en el desarrollo de cálculos y dibujo de planos, de un sistema de potabilización de agua convencional, es considerablemente alto y dispendioso, se hace necesaria la utilización de programas de computadora. En el mercado se pueden encontrar hojas de cálculo o programas pequeños que solo realizan los cálculos de algunos sistemas hidráulicos que componen una planta de tratamiento, y la mayoría de estos no son enfocados en realidad al cálculo de un sistema de potabilización, por lo general solo se encuentran softwares que calculan la hidráulica en la red tuberías, como el programa WaterCAD, y otros muy complejos como el Sap2000, que están más enfocados al diseño estructural y en donde se pueden diseñar estructuras hidráulicas como reservorios, es por esto que se decide para este trabajo de grado crear un software, denominado DipTAP, que esté enfocado solo para plantas de tratamiento de agua.

DipTAP es un software novedoso que además de realizar cálculos, presenta archivos con extensión .DXF, los cuales contienen coordenadas para poder visualizar las vistas en planta de los elementos que conforman este sistema de potabilización, en programas como AutoCAD o cualquier otro programa que pueda leer este tipo de archivos de formato dxf. El aporte para la ingeniería civil y sanitaria, será el ahorro considerable en el tiempo de cálculo, y además obtener diseños más eficientes, ya que se pueden hacer muchos en un mínimo de tiempo y elegir el que más se ajuste a lo que se desea.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL.

Desarrollar un programa de computador que permita diseñar y dibujar en planta los diferentes elementos de un sistema de potabilización de funcionamiento hidráulico.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Generar un algoritmo para el cálculo y dibujo de un sistema de mezcladores rápidos con canales rectangulares o con canaletas Parshall.
- Generar un algoritmo para el cálculo y dibujo de un sistema de mezcladores lentos de flujo horizontal y vertical.
- Generar un algoritmo para el cálculo y dibujo de sedimentadores de alta tasa
- Generar un algoritmo para el cálculo y dibujo de filtros autolavantes

### 3. CONCEPTOS PRELIMINARES

Este capítulo presenta las diferentes características del agua, tanto físicas como químicas, así como los diferentes componentes mineralógicos con que esta entra en contacto, en su recorrido por el suelo.

#### 3.1. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA

Las características del agua ya sean físicas, químicas o microbiológicas deben cumplir con ciertos parámetros de calidad, para que sea considerada apta para el consumo humano, por lo cual se hace necesario fijar rangos en los cuales se establezcan unas determinadas condiciones para poder definir el tratamiento que se le pueda dar a una determinada fuente de agua.

##### 3.1.1. Características físicas

Son aquellas que se pueden detectar con los sentidos. Lo cual implica que tienen incidencia directa sobre las condiciones estéticas de agua. Las características físicas son la turbiedad, el color, el sabor, el olor y la temperatura [1]. En la tabla 1 se pueden apreciar los valores máximos aceptables para estas características.

**Tabla 1.** Características físicas del agua [3]

<b>Características</b>	<b>Expresadas como</b>	<b>Valor máximo aceptable</b>
Color aparente	Unidades de platino cobalto (UPC)	15
Olor y sabor	Aceptable o no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

##### 3.1.2. Características químicas

Por ser el agua un solvente universal, existe la posibilidad que una inmensa cantidad de elementos y compuestos estén presentes en ella en forma de solución; sin embargo, la gran mayoría de estos no tienen mucho significado y es por esto que se consideran algunos de estos solamente, teniendo en cuenta su posible prevalencia en el agua, los efectos adversos que pueden tener sobre la salud, la influencia que tengan en los procesos de tratamiento o las implicaciones de tipo económico [1]. A continuación se presentan diferentes elementos y compuestos que pueden estar presentes en el agua que pueden tener un efecto adverso sobre la salud humana.

**Tabla 2.** Características químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana [3].

<b>Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias</b>	<b>Expresadas como</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN-	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

**Tabla 3.** Características químicas que tienen mayores consecuencias económicas e indirectas sobre la salud humana [3].

<b>Elementos y compuestos químicos que tienen implicaciones de tipo económico</b>	<b>Expresadas como</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Calcio	Ca	60
Alcalinidad total	CaCO <sub>3</sub>	200
Cloruros	Cl <sup>-</sup>	250
Aluminio	Al <sup>3+</sup>	0,2
Dureza total	Ca CO <sub>3</sub>	300
Hierro total	Fe	0,3
Magnesio	Mg	36
Manganeso	Mn	0,1
Molibdeno	Mo	0,07
Sulfatos	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	250
Zinc	Zn	3
Fosfatos	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,5

**Tabla 4.** Características químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana [3].

<b>Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana</b>	<b>Expresadas como</b>	<b>Valor máximo aceptable (mg/L)</b>
Carbono orgánico total	COT	5,0
Nitritos	NO <sub>2</sub>	0,1
Nitratos	NO <sub>3</sub>	10
Fluoruros	F	1,0

### 3.1.3. Características microbiológicas

Todos los organismos que se encuentran en el agua son importantes en el momento de establecer el control de la calidad de la misma sin considerar si tienen su medio natural de vida en el agua o pertenecen a poblaciones transitorias introducidas por el ser humano; si su crecimiento lo propician los nutrientes presentes en el escurrimiento natural y en aguas residuales municipales o lo frenan los venenos procedentes de la actividad agrícola o industrial [4].

Las bacterias no solo pueden provocar enfermedades cuando entran en el cuerpo humano a través de los alimentos, las aguas superficiales también pueden ser una fuente importante de infecciones bacterianas. La siguiente tabla indica algunos de los microorganismos más importantes.

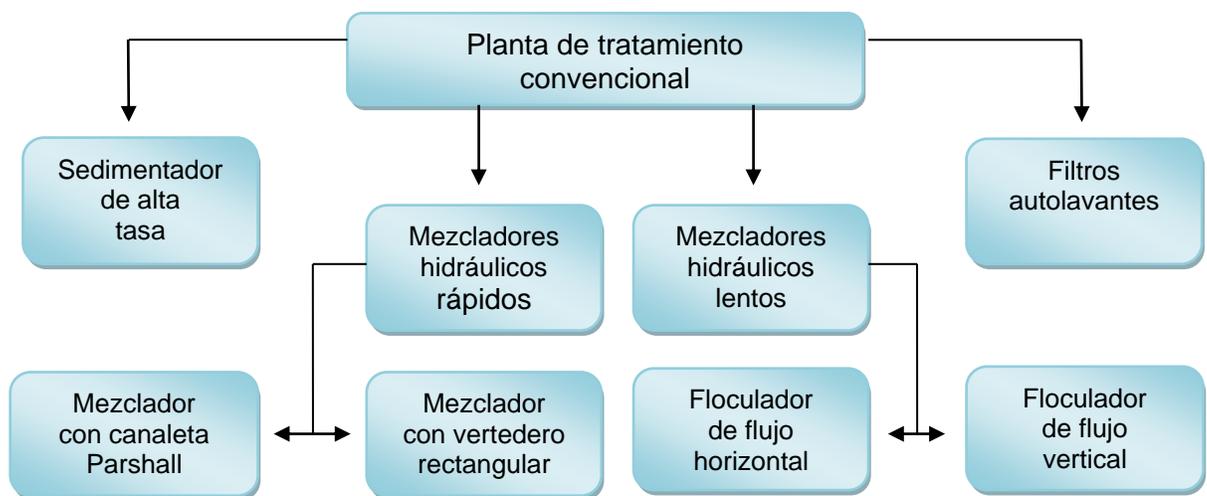
**Tabla 5.** Características microbiológicas [3].

<b>Técnicas utilizadas</b>	<b>Coniformes totales</b>	<b>Escherichia coli</b>
Filtración por membrana	0 UFC/100 cm <sup>3</sup>	0 UFC/100 cm <sup>3</sup>
Enzima sustrato	<de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	<de 1 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>
Sustrato definido	0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>	0 microorganismo en 100 cm <sup>3</sup>
Presencia – Ausencia	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>	Ausencia en 100 cm <sup>3</sup>

## 4. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE POTABILIZACIÓN

Este capítulo describe el marco teórico de los sistemas hidráulicos que se van a implementar en la planta de tratamiento, así como los parámetros, ecuaciones y procesos de cálculo (diagramas de flujo) necesarios para el diseño de los mismos.

Las plantas convencionales de tratamiento de agua superficial utilizan una secuencia de procesos más o menos estándar. Después de filtrar objetos grandes como peces y palos, se añaden coagulantes químicos al agua para lograr que las diminutas partículas en suspensión que enturbian el agua se atraigan entre sí para formar “flóculos”. La floculación (la formación de flóculos de mayor tamaño a partir de flóculos más pequeños) típicamente se logra por medio del agitado leve y constante del agua para estimular a las partículas y pequeños flóculos para que “choquen” entre sí, se adhieran, y formen un flóculo de mayor tamaño. Cuando los flóculos son lo suficientemente grandes y pesados para sedimentarse, el agua se traslada a estanques de sedimentación o decantación. Cuando la mayoría de los sólidos se han sedimentado, típicamente ocurre alguna forma de filtración ya sea por medio de arena o de membranas. La desinfección es usualmente el siguiente paso. Después de la desinfección, se pueden agregar diversos productos químicos para ajustar el pH, para prevenir la corrosión del sistema de distribución, o para prevenir la caries dental. El intercambio iónico o carbón activado se puede usar durante algunas partes de este proceso con el fin de eliminar los contaminantes orgánicos o inorgánicos. Las fuentes de agua subterránea usualmente tienen una mayor calidad inicialmente y tienden a necesitar menos tratamiento que las fuentes de agua superficiales [5]. En la figura 1, se pueden apreciar los elementos hidráulicos de la planta de tratamiento convencional que serán tratados en este trabajo de grado.



**Figura 1.** Sistemas hidráulicos de una planta de tratamiento de agua convencional

A continuación se describen los fundamentos, parámetros y ecuaciones necesarias para el adecuado diseño de cada uno de los sistemas hidráulicos a implementar.

#### **4.1. MEZCLADORES HIDRÁULICOS RÁPIDOS**

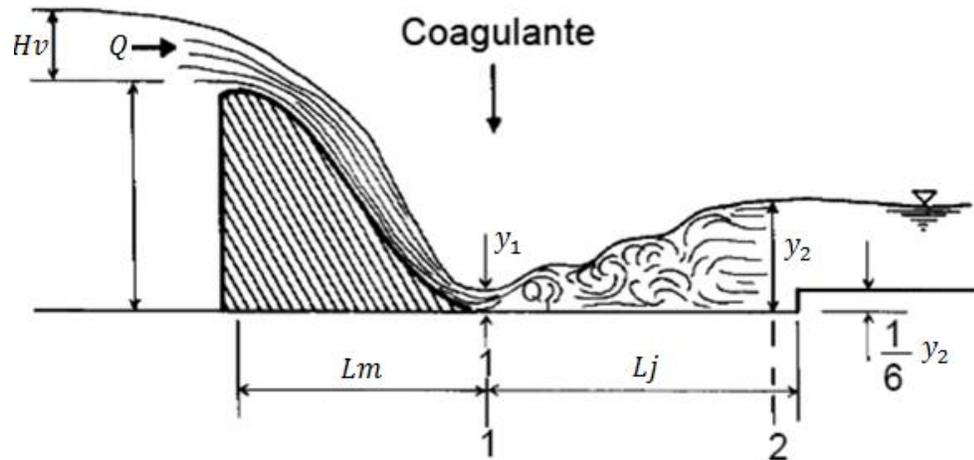
Se denomina mezcla rápida a las condiciones de intensidad de agitación y tiempo de retención que debe reunir la masa de agua en el momento en que se dosifica el coagulante, con la finalidad de que las reacciones de coagulación se den en las condiciones óptimas correspondientes al mecanismo de coagulación predominante. La dosificación se realiza en la unidad de mezcla rápida; por lo tanto, estas condiciones son las que idealmente debe reunir esta unidad para optimizar el proceso [6].

En la coagulación por adsorción, las reacciones con aluminio que preceden a la neutralización de la carga son muy rápidas y ocurren en milésimas de segundos cuando no hay formación de polímeros hidrolíticos de  $Al^{+3}$ , y en un segundo cuando estos se forman. En cambio, la formación del precipitado de hidróxido de aluminio antes de la coagulación de barrido es lenta y se produce en un rango de 1 a 7 segundos [6].

##### **4.1.1. Mezclador rápido con vertedero rectangular**

El agua cruda que llega a la planta, a través de un sistema de captación, es recibida por una estructura denominada cámara de aquietamiento cuya función es disminuir la velocidad del agua y garantizar un tiempo de retención en esta, para remover algunas de las partículas más grandes que no fueron retenidas en anteriores sistemas hidráulicos como los desarenadores. La cámara está provista de un vertedero rectangular que cumple las funciones de aforar el caudal que ingresa a la planta y la de proporcionar un resalto hidráulico para facilitar la mezcla entre productos químicos (coagulantes) con el agua.

Para asegurar una dispersión homogénea y continua del coagulante en toda la masa de agua cruda, el coagulante debe aplicarse sobre la sección 1 (ver figura 2), a una distancia  $L_m$  del vertedero. La aplicación del coagulante a una distancia menor a  $L_m$  no es recomendable, porque haría que una parte del agua cruda recibiese una dosis mayor de coagulante y la restante una dosis menor. Cuando la lámina de agua llega al fondo, se divide en una corriente principal que sigue adelante y una corriente secundaria que retorna haciendo que una masa de agua sea represada contra el vertedero [7].



**Figura 2.** Perfil del vertedero rectangular [8].

#### 4.1.1.1. Parámetros de diseño para el mezclador rápido con vertedero rectangular

Para el adecuado diseño de la cámara de quietamiento con vertedero rectangular, se deben tener en cuenta las recomendaciones de la tabla 6, la cual muestra los diferentes parámetros a considerar, en la implementación de este sistema hidráulico.

**Tabla 6.** Parámetros de diseño para el mezclador rápido con vertedero rectangular.

Descripción	Rango	Fuente
Caudal (Q)	Hasta 100 L/seg	[9]
Tiempo de retención (t)	De 10 a 60 seg	Ras 2000
Velocidad ascensional (Vasc)	De 4 a 10 cm/seg	Ras 2000
Número de Froude (Fr)	Entre 4.5 y 9	Ras 2000 título C
Gradiente (G)	Entre 1000 y 2000 $s^{-1}$	Ras 2000 título C
Profundidad mínima	30 cm	Dimensión mínima constructiva

Las ecuaciones necesarias para el cálculo de este sistema, se encuentran consignadas en la tabla 7, las cuales proporcionan un diseño confiable y un cálculo muy aproximado de la hidráulica que se observará en la implementación o funcionamiento final de la planta de tratamiento. El procedimiento de cálculo o diagrama de flujo a seguir para el diseño, está consignado en el numeral 4.5 de este mismo capítulo.

**Tabla 7.** Ecuaciones para el cálculo del mezclador rápido con vertedero rectangular

Calculo	Unidad	Ecuación	Parámetros	Referencia	Numero
Área superficial de la cámara	$m^2$	$Asup = \frac{Q}{Vasc}$	$Q$ = Caudal $Vasc$ = Velocidad ascensional	[10]	Ec A.1
Volumen de la cámara	$m^3$	$Vol = Q * td$	$Q$ = Caudal $td$ = tiempo de detención(asumido)	[10]	Ec A.2
Profundidad de la cámara	$m$	$H = \frac{Vol}{Asup}$	$Vol$ = volumen de la cámara $Asup$ = Área de la cámara	[10]	Ec A.3
Ancho de la cámara	$m$	$b = \sqrt{\frac{Asup}{2}}$	$Asup$ = Área de la cámara	[10]	Ec A.4
Largo de la cámara	$m$	$L = 2 * b$	$b$ = ancho de la cámara	Ecuación empírica	Ec A.5
Lámina de agua sobre el vertedero	$m$	$Hv = \left(\frac{Q}{1.84 * b}\right)^{\frac{2}{3}}$	$Q$ = Caudal $b$ = ancho de la cámara	Ecuación empírica	Ec A.6
Altura del vertedero	$m$	$P = H - Hv$	$H$ = Altura de la cámara $Hv$ = Lamina de agua en el vertedero	[10]	Ec A.7
Distancia de caída del agua	$m$	$Lm = 1.45P^{0.54}Hv^{0.46}$	$P$ = Altura del vertedero $Hv$ = Lamina de agua en el vertedero	Ecuación de Scimeni	Ec A.8
Altura Critica	$m$	$y_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{b^2 * g}}$	$Q$ = Caudal $b$ = ancho de la cámara $g$ = gravedad	[10]	Ec A.9

Continuación de la tabla 7

Primera altura conjugada del resalto hidráulico	$m$	$y_1 = \frac{\sqrt{2}y_c}{1.06 + \sqrt{\frac{p}{y_c} + 1.5}}$	$y_c =$ altura crítica $p =$ Altura del vertedero	[10]	<i>Ec A.10</i>
Velocidad en la sección 1	$\frac{m}{s}$	$v_1 = \frac{Q}{b * y_1}$	$Q =$ Caudal $b =$ ancho de la cámara $y_1 =$ primera altura del resalto	[10]	<i>Ec A.11</i>
Numero de Froude	-	$Fr1 = \frac{v_1}{\sqrt{g * y_1}}$	$v_1 =$ Velocidad en la sección 1 $y_1 =$ primera altura del resalto $g =$ gravedad	Número de Froude	<i>Ec A.12</i>
Segunda altura conjugada del resalto hidráulico	$m$	$y_2 = \frac{y_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr1^2} - 1 \right)$	$y_1 =$ primera altura del resalto $Fr1 =$ Número de Froude	[10]	<i>Ec A.13</i>
Velocidad en la sección 2	$\frac{m}{s}$	$v_2 = \frac{Q}{b * y_2}$	$Q =$ Caudal $b =$ ancho de la cámara $Y_2 =$ segunda altura del resalto	Ecuación de continuidad	<i>Ec A.14</i>
Velocidad media	$\frac{m}{s}$	$Vm = \frac{v1 + v2}{2}$	$v1 =$ Velocidad en la sección 1 $v2 =$ Velocidad en la sección 2	[10]	<i>Ec A.15</i>
Longitud del resalto	$m$	$Lj = 6 * (y_1 - y_2)$	$y_1 =$ primera altura del resalto $y_2 =$ segunda altura del resalto	[9]	<i>Ec A.16</i>
Tiempo de mezcla	$s$	$tm = \frac{lj}{Vm}$	$lj =$ longitud del resalto $Vm =$ velocidad media	[10]	<i>Ec A.17</i>
Pérdida de carga en el resalto	$m$	$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4 * y_1 * y_2}$	$y_1 =$ primera altura del resalto $Y_2 =$ segunda altura del resalto	Ecuación de Belanger	<i>Ec A.18</i>
Gradiente	$s^{-1}$	$G = \sqrt{\frac{\gamma * \Delta H}{\mu * tm}}$	$\gamma =$ peso específico del agua $\mu =$ viscosidad dinámica $\Delta H =$ pérdida de carga $tm =$ tiempo de mezcla	[10]	<i>Ec A.19</i>

#### 4.1.2. Mezclador rápido con canaleta Parshall

La canaleta Parshall es un tipo de medidor perfeccionado del de *Venturi*, estudiado para el aforo de aguas destinadas al riego agrícola. Es un dispositivo de aforo bastante exacto, aunque no tanto como el medidor *Venturi*, pero tiene la ventaja de que su costo es menor. La canaleta Parshall ha sido empleada como dispositivo de medición de gastos en las plantas de tratamiento de aguas residuales, instalaciones en las que el bajo costo es cuestión de importancia. Ha resultado un medio de aforo satisfactorio y también muy útil para verificar la velocidad en los desarenadores. Los medidores *Venturi* y Parshall, dotados de dispositivos apropiados, pueden emplearse también para la dosificación de productos químicos a agregar a las aguas en proporción directa a su gasto [11]. La ventaja de la canaleta Parshall, es que su forma no permite la acumulación de sólidos en ninguna parte del canal. Su diseño hidráulico se ha hecho de tal manera que el gasto es una función lineal de la altura del tirante a la entrada del dispositivo. La figura 3 muestra su configuración, que en el sentido de escurrimiento, inicia con una sección convergente donde el piso es horizontal, continúa con una sección de paredes paralelas de corta longitud denominada "garganta" en donde el piso tiene pendiente descendente, y termina con una sección divergente cuyo piso es de pendiente positiva [11].

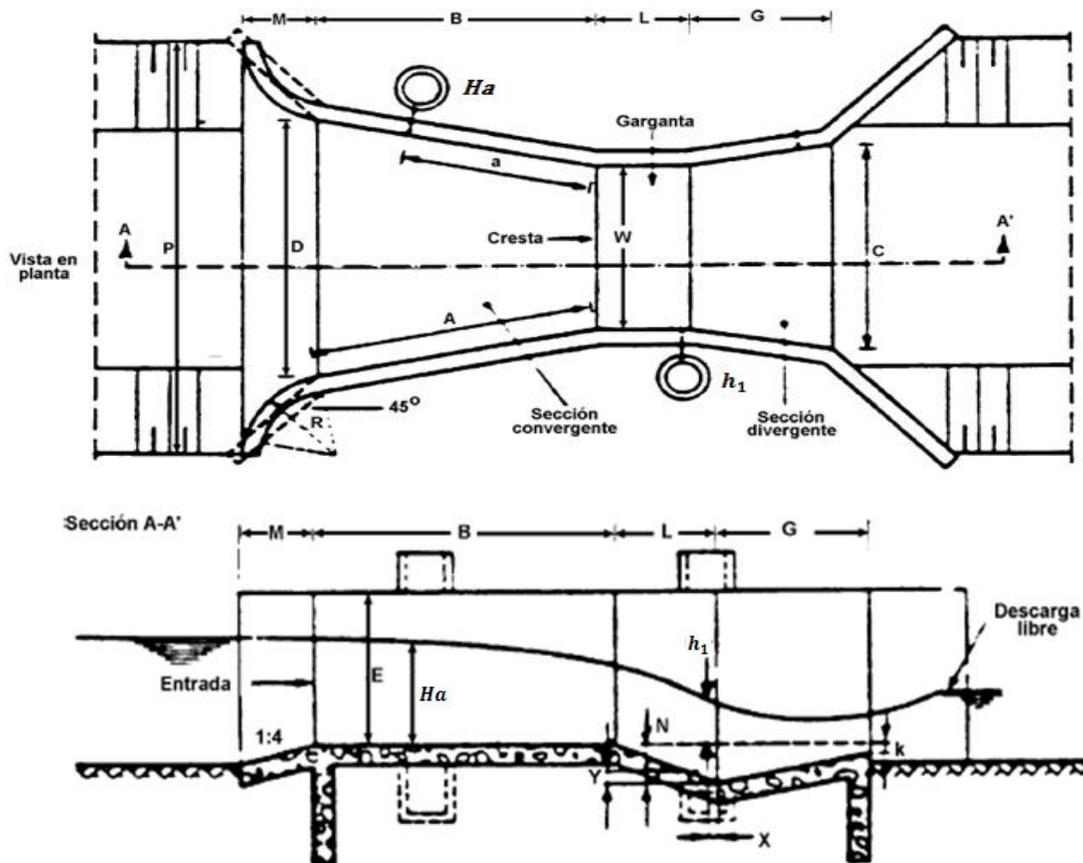


Figura 3. Geometría de una canaleta Parshall [11]

En el canal Parshall se tienen dos puntos de medición de carga hidráulica: uno aguas arriba, situado en la sección convergente (designado con  $H_a$  en la Figura 3), y otro situado en la salida de la garganta (designado con  $h_1$  en la misma figura). Tanto  $H_a$  como  $h_1$  se miden utilizando el piso horizontal de la sección convergente como nivel de referencia [11].

#### 4.1.2.1. Parámetros de diseño para la canaleta Parshall

Para que una canaleta Parshall pueda funcionar como elemento hidráulico de mezcla rápida, se deben seguir los parámetros de la tabla 8, en especial los de gradiente, número de Froude y descarga libre, ya que si estos tres parámetros no se cumplen el resalto generado no cumplirá con las expectativas de mezcla deseadas.

**Tabla 8.** Parámetros para el diseño de la canaleta Parshall

Descripción	Rango	Fuente
Caudal (Q)	Mayor a $100 \frac{l}{s}$	[1]
Numero de Froude (Fr)	Entre 1.7 y 2.5 o entre 4.5 y 9.0.	Ras 2000 título C
Gradiente (G)	Entre 1000 y 2000 $S^{-1}$	Ras 2000 título C
Velocidad mínima en la garganta	mayor de 2 m/s.	Ras 2000 título C
Descarga libre	$\frac{H_b}{H_a} \leq 0.6$ para $W \leq 22.9$ cm $\frac{H_b}{H_a} \leq 0.7$ para $30.5 \leq W < 244$ cm $\frac{H_b}{H_a} \leq 0.8$ para $W \geq 305$ cm	[10]
Velocidad mínima del efluente aproximadamente 0.75 m/s.	aproximadamente 0.75 m/s.	Ras 2000 título C
$\frac{H_a}{W}$	entre 0.4 y 0.8	Ras 2000 título C

El diseño de la canaleta Parshall empieza con la elección de las dimensiones estándar de esta, que dependen inicialmente del rango de caudal que se quiera tratar (ver tabla 9), luego se calculan las variables de las ecuaciones de la tabla 10, verificando que los resultados obtenidos estén dentro de los rangos mencionados anteriormente. Si la canaleta escogida no cumple con estos rangos, se debe elegir otra canaleta o elegir la que este más cercana a estos valores.

**Tabla 9.** Características de descarga de canales Parshall [11]

ANCHO DE GARGANTA $w$ , en mm	INTERVALO DE DESCARGA		ECUACIÓN DEL GASTO. $Q$ , en $m^3/s$ $Ha$ , en m	INTERVALO DE CARGA HIDRÁULICA		LÍMITE MODULAR $h_1/Ha$
	MÍNIMO $Q$ , (L/s)	MÁXIMO $Q$ , (L/s)		MÍNIMO $h_1$ , en m	MÁXIMO $h_1$ , en m	
76.2	0.77	32.1	$Q = 0.1770 Ha^{1.55}$	0.030	0.33	0.5
152.4	1.50	111.1	$Q = 0.3812 Ha^{1.580}$	0.030	0.45	0.6
228.6	2.50	251.0	$Q = 0.5354 Ha^{1.530}$	0.030	0.61	0.6
304.8	3.32	457.0	$Q = 0.6909 Ha^{1.520}$	0.030	0.76	0.7
457.2	4.80	695.0	$Q = 1.0560 Ha^{1.538}$	0.030	0.76	0.7
609.6	12.10	937.0	$Q = 1.4280 Ha^{1.550}$	0.046	0.76	0.7
914.4	17.60	1427.0	$Q = 2.1840 Ha^{1.566}$	0.046	0.76	0.7
1219.2	35.80	1923.0	$Q = 2.9530 Ha^{1.578}$	0.060	0.76	0.7
1524.0	44.10	2424.0	$Q = 3.7320 Ha^{1.587}$	0.076	0.76	0.7
1828.8	74.10	2929.0	$Q = 4.5190 Ha^{1.595}$	0.076	0.76	0.7
2133.6	85.80	3438.0	$Q = 5.3120 Ha^{1.601}$	0.076	0.76	0.7
2438.4	97.20	3949.0	$Q = 6.1120 Ha^{1.607}$	0.076	0.76	0.7

**Tabla 10.** Ecuaciones para el dimensionamiento de la canaleta Parshall

Cálculo	Unidad	Ecuación	Parámetros	Referencia	Numero
Ancho en la sección de medida	$m$	$D' = \frac{2}{3} * (D - W) + W$	$W$ = ancho de garganta $D$ = ancho canaleta	-	Ec B.1
Velocidad en la sección a	$\frac{m}{s}$	$Va = \frac{Q}{Ha * D'}$	$Q$ = caudal $Ha$ = altura en la zona convergente $D'$ = Ancho en la sección de medida	-	Ec B.2
Energía en la sección a	$m$	$E_a = N + Ha + \frac{Va^2}{2 * g}$	$g$ = gravedad $N$ = altura de referencia $Ha$ = altura en la zona convergente $Va$ = velocidad en la zona convergente	Bernoulli	Ec B.3
Angulo de la pendiente	$rad$	$\theta = \arccos \frac{-g * Q}{W (0.67 * g * Ea)^{1.5}}$	$g$ = gravedad $Q$ = caudal $E_a$ = energía en la zona convergente $W$ = ancho de garganta	-	Ec B.4
Velocidad en la sección 1	$\frac{m}{s}$	$V1 = 2 * \cos\left(\frac{\theta}{3}\right) \left[\frac{2 * g * Ea}{3}\right]^{0.5}$	$E_a$ = energía en la zona convergente $g$ = gravedad $\theta$ = angulo de la pendiente	-	Ec B.5
Altura en la sección 1	$m$	$h_1 = \frac{Q}{V_1 * W}$	$V_1$ = velocidad en la garganta $W$ = ancho de garganta $Q$ = caudal	-	Ec B.6
Energía en la sección 1	$m$	$E_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2 * g}$	$h_1$ = altura en la garganta $V_1$ = velocidad en la garganta $g$ = gravedad	-	Ec B.7

Continuación de la tabla 10

Numero de Froude	-	$Fr_1 = \frac{V_1}{\sqrt{g * h_1}}$	$V_1$ = velocidad en la garganta $g$ = gravedad $h_1$ = altura en la garganta	Numero de Froude	<i>Ec B.8</i>
Segunda altura conjugada del resalto	$m$	$h_3 = \frac{h_1}{2} * (\sqrt{1 + 8 * Fr_1^2} - 1)$	$h_1$ = altura en la garganta $Fr_1$ = numero de Froude	-	<i>Ec B.9</i>
Altura en la sección 2	$m$	$h_2 = h_3 - N + K$	$h_3$ = segunda altura conjugada $N$ = altura de referencia $K$ = altura de referencia	-	<i>Ec B.10</i>
Velocidad en la sección 2	$\frac{m}{s}$	$V_2 = \frac{Q}{h_2 * C}$	$Q$ = caudal $h_2$ = altura en la zona divergente $C$ = ancho en la sección de salida	-	<i>Ec B.11</i>
Energía en la sección 2	$m$	$E_2 = h_3 + \frac{V_2^2}{2 * g}$	$h_3$ = segunda altura conjugada $V_2$ = velocidad en la zona divergente	Bernoulli	<i>Ec B.12</i>
Pérdida de carga	$m$	$\Delta H = E_1 - E_2$	$E_1$ = energía en la garganta $E_2$ = energía en la zona divergente	-	<i>Ec B.13</i>
Velocidad media	$\frac{m}{s}$	$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2}$	$V_1$ = velocidad en la garganta $V_2$ = velocidad en la zona divergente	-	<i>Ec B.14</i>
Tiempo de mezcla	$s$	$tm = \frac{G}{V_m}$	$G$ = longitud del resalto $V_m$ = velocidad media	-	<i>Ec B.15</i>
Gradiente hidráulico	$s^{-1}$	$Gradiente = \sqrt{\frac{\gamma * \Delta H}{\mu * tm}}$	$\gamma$ = peso específico del agua $\mu$ = viscosidad dinámica $tm$ = tiempo de mezcla $\Delta H$ = pérdida de carga	-	<i>Ec B.16</i>

## **4.2. MEZCLADORES HIDRÁULICOS LENTOS**

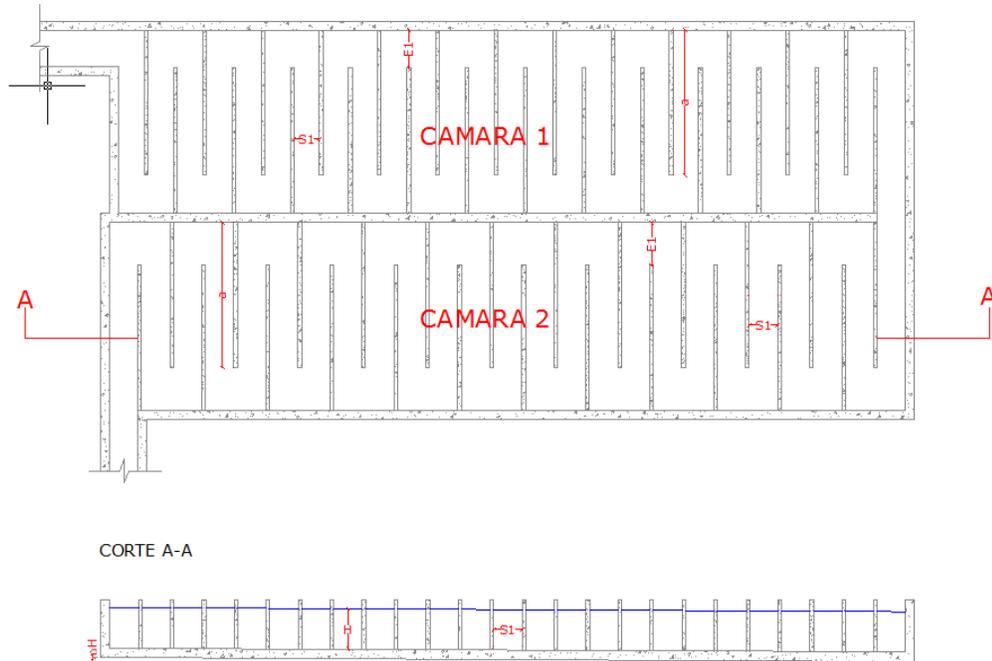
La mezcla lenta (floculación) se refiere a la aglomeración de partículas coaguladas en partículas floculentas; es el proceso por el cual, una vez desestabilizados los coloides, se provee una mezcla suave de las partículas para incrementar la tasa de encuentros o colisiones entre ellas sin romper o disturbar los agregados preformados. De la misma manera que la coagulación, la floculación es influenciada por fuerzas químicas y físicas tales como la carga eléctrica de las partículas, la capacidad de intercambio, el tamaño y la concentración del floc, el pH, la temperatura del agua y la concentración de electrolitos [9].

En la floculación, una vez introducido y mezclado el coagulante, las partículas diminutas coaguladas son puestas en contacto una con otra y con las demás partículas presentes, mediante agitación lenta prolongada, floculación, durante la cual las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren mayor densidad. El floculador es, por lo tanto, un tanque con algún medio de mezcla suave y lenta, con un tiempo de detención relativamente prolongado, generalmente de 10 a 30 minutos [9].

### **4.2.1. Mezclador hidráulico lento de flujo horizontal**

La unidad puede estar configurada de diversas formas; puede constar de un solo tanque con tres o cuatro tramos con diferentes anchos de canales, o tres o cuatro tanques con anchos de canales diferentes en cada uno. El agua circula horizontalmente por entre los canales. Los canales pueden estar conformados por muros o tabiques de concreto, o bien por pantallas de asbesto cemento o madera machihembrada. Los muros de concreto impiden que se puedan efectuar modificaciones o ampliaciones posteriores, por lo que lo más usual es construirlas con pantallas removibles. El fondo debe tener un desnivel o pendiente de acuerdo con la pérdida de carga en cada tramo, para que la altura de agua sea uniforme y por lo tanto la velocidad y el gradiente de velocidad también. Las placas deben estar sujetas de tal manera que no se muevan al paso del agua y mantengan su paralelismo [12].

En la figura 4, se puede apreciar un esquema con la vista en planta de un floculador de flujo horizontal con 2 cámaras, donde la separación de los tabiques aumenta a medida que el agua va avanzando por las cámaras, garantizando así una disminución de la velocidad y del gradiente, que es lo recomendable para este tipo de sistemas hidráulicos de mezcla lenta.



**Figura 4.** Floculador hidráulico de flujo horizontal

#### 4.2.1.1. Parámetros de diseño para el floculador hidráulico de flujo horizontal

Como la eficiencia es función del número de cámaras, para los niveles bajo y medio de complejidad no deben diseñarse menos de dos unidades en serie y para los niveles medio alto y alto de complejidad mínimo cuatro unidades [13]. El gradiente y la velocidad deben ser descendentes a medida que el agua pasa de una cámara a otra.

La tabla 11 muestra los rangos en que deben de estar los parámetros de diseño recomendados para el adecuado funcionamiento e implementación del floculador de flujo horizontal.

**Tabla 11.** Parámetros para el diseño del floculador hidráulico de flujo horizontal

Descripción	Rango	Fuente
Caudal (Q)	Menor a 50 L/seg	[14]
Tiempo de retención (t)	Entre 20 y 30 minutos	Ras 2000 titulo C
Gradiente (G)	Entre 20 y 70 $S^{-1}$	Ras 2000 titulo C
Ancho ( $S_1$ )	Mínimo 0.3 m	Dimensión mínima constructiva
Velocidad (V)	Entre 0.2 y 0.6 m/seg	Ras 2000 título C
Numero de cámaras	Mínimo 2	[14]

**Tabla 12.** Ecuaciones para el cálculo del floculador hidráulico de flujo horizontal

Calculo	Unidad	Ecuación	Parámetros	Referencia	Numero
Área mojada	$m^2$	$A = \frac{Q}{V}$	$Q$ = caudal $V$ = velocidad	-	Ec C.1
Separación entre placas	$m$	$S_1 = \frac{A}{H}$	$A$ = área mojada $H$ = tirante	-	Ec C.2
Longitud del recorrido del agua	$m$	$Lr = V * t$	$V$ = velocidad $t$ = tiempo detención por cámara	-	Ec C.3
Distancia borde del floculador al tabique	$m$	$E_1 = 1.5 * S_1$	$S_1$ = separación entre placas	-	Ec C.4
Número de canales	<i>uni</i>	$Nc = \frac{Lr}{a + E_1}$	$Lr$ = longitud del recorrido del agua $E_1$ = distancia borde floculador - tabique	-	Ec C.5
Número de tabiques	<i>uni</i>	$Nt = Nc - 1$	$Nc$ = numero de cámaras	-	Ec C.6
Longitud real	$m$	$L_{real} = Nc * (a + E_1)$	$a$ = largo de la placa	-	Ec C.7
Velocidad	$\frac{m}{s}$	$v = \frac{Q}{S_1 * H}$	$Q$ = caudal $S_1$ = separación entre placas $H$ = tirante	-	Ec C.8
Perímetro mojado	$m$	$P = 2H + S_1$	$H$ = tirante $S_1$ = separación entre placas	-	Ec C.9

Continuación de la tabla 12

Radio hidráulico	$m$	$R = \frac{A}{P}$	$A = \text{área mojada}$ $P = \text{perímetro mojado}$	-	<i>Ec C.10</i>
Pérdida por fricción	$m$	$\Delta h_f = \frac{V^2 * N^2 * L_{real}}{R^{4/3}}$	$V = \text{velocidad}$ $N = \text{coeficiente de fricción}$ $L_{real} = \text{longitud real}$ $R = \text{radio hidráulico}$	-	<i>Ec C.11</i>
Pérdidas por cambio de dirección	$m$	$\Delta H_{cd} = \frac{\Delta K * V^2}{2g} * Nt$	$g = \text{gravedad}$ $\Delta K = \text{coeficiente}$ $V = \text{velocidad}$ $Nt = \text{numero de tabiques}$	-	<i>Ec C.12</i>
Sumatoria de pérdidas	$m$	$\Delta H = \Delta h_f + \Delta h_{cd}$	$\Delta h_f = \text{pérdidas por fricción}$ $\Delta h_{cd} = \text{pérdidas por cambio de dirección}$	-	<i>Ec C.13</i>
Gradiente	$S^{-1}$	$G = \sqrt{\frac{\gamma * \Delta H}{\mu * t}}$	$\gamma = \text{peso específico del agua}$ $\mu = \text{viscosidad dinámica}$ $tm = \text{tiempo de mezcla}$ $\Delta H = \text{pérdida de carga}$	-	<i>Ec C.14</i>

#### 4.2.2. Mezclador hidráulico lento de flujo vertical

La unidad debe tener un volumen que reproduzca el tiempo total de floculación que optimiza el proceso. Debe estar compuesta por varios canales con compartimentos de diferentes anchos que reproduzcan velocidades decrecientes entre el primer y el último canal. El agua circula por los canales en forma vertical. Las pantallas para formar los compartimentos en cada canal, pueden ser tabiques de concreto, placas de asbesto cemento o madera machihembrada [12]. La unidad puede tener una profundidad de 2 m a 5 m, debe dejarse una abertura en la base de cada pantalla con un área equivalente al 5% del área horizontal del compartimiento, para prevenir la acumulación de lodos [13].

Además del sentido del flujo, un floculador vertical se diferencia de un horizontal, por la capacidad en cuanto a caudal, ya que el floculador vertical se recomienda utilizar para caudales grandes (mayores a 50 L/s), mientras que el caudal recomendado para un floculador horizontal es de hasta 50 L/s [14].

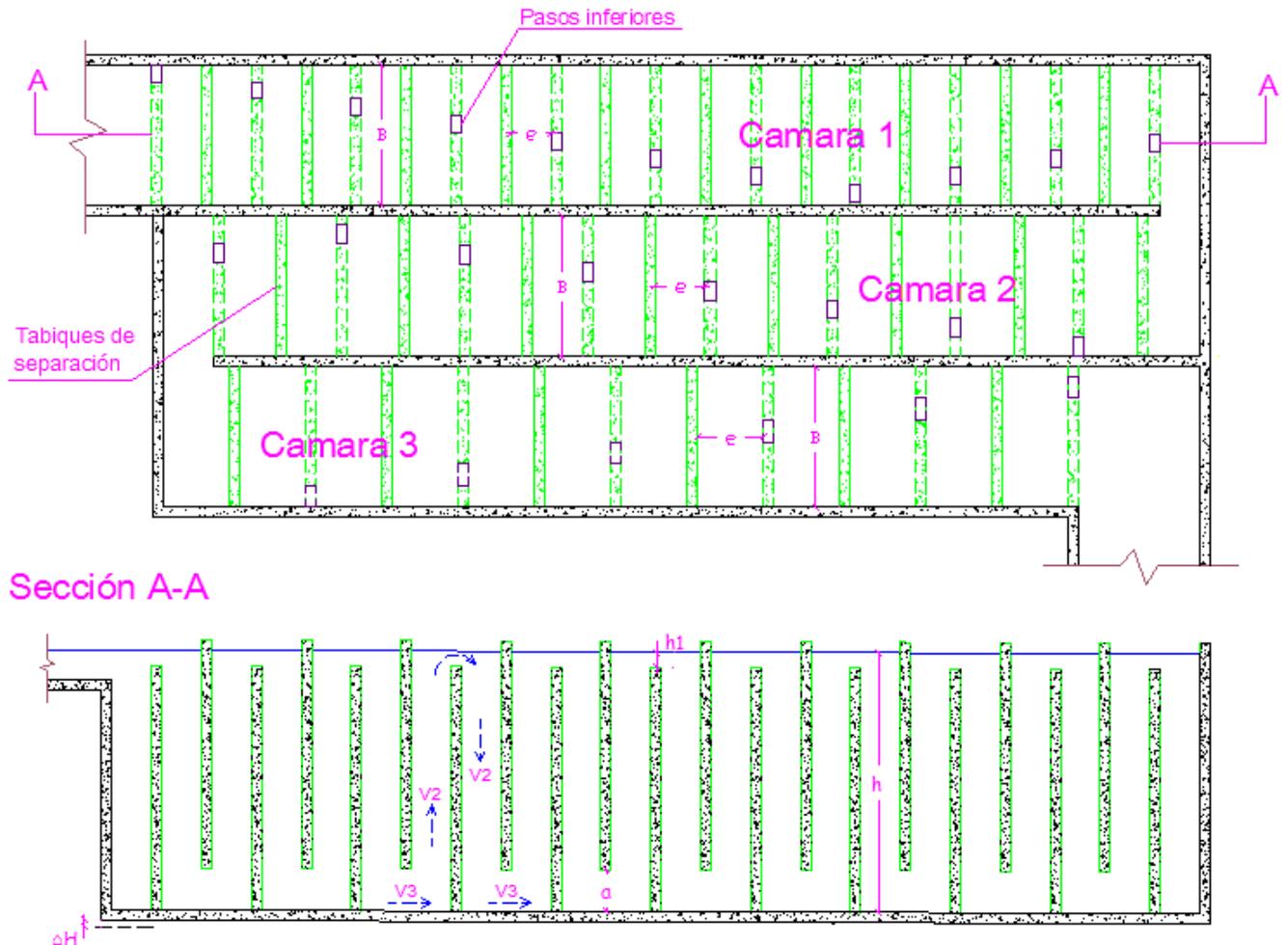


Figura 5. Floculador hidráulico de flujo vertical

#### 4.2.2.1. Parámetros de diseño para el floculador hidráulico de flujo vertical

Al igual que el floculador de flujo horizontal, uno de flujo vertical debe presentar una disminución de la velocidad a medida que el agua pasa por los tabiques de las cámaras, esto para que se presente también un descenso del gradiente lo cual hará que la mezcla lenta sea más eficiente y que no se presente rompimiento del floc.

El diseño debe garantizar que el tiempo de contacto en la unidad sea el suficiente, para permitir que los flocúlos alcancen el tamaño y peso adecuado, lo cual es función de la dosis, el gradiente de velocidad y el tiempo que se mantenga la agitación en concordancia con la prueba de jarras [13].

**Tabla 13.** Parámetros de diseño para el floculador hidráulico de flujo vertical

Descripción	Rango	Fuente
Caudal (Q)	Mayor de 50 L/s	[14]
Tiempo de retención (t)	Entre 20 y 30 minutos	Ras 2000 título C
Gradiente (G)	Entre 20 y 70 $S^{-1}$	Ras 2000 título C
Profundidad (H)	Entre 2 y 5 m	Ras 2000 título C
Velocidad (V)	Entre 0.2 y 0.6 m/s	Ras 2000 título C
Cámaras	Mínimo 2	Ras 2000

Teniendo en cuenta los parámetros anteriormente mencionados y las recomendaciones de la tabla 13, se puede obtener un diseño confiable y eficiente una vez efectuado el cálculo de las ecuaciones consignadas en la siguiente tabla:

**Tabla 14.** Ecuaciones para el cálculo del floculador hidráulico de flujo vertical

Calculo	Unidad	Ecuación	Parámetros	Referencia	Numero
Pérdida de energía en el tanque	<i>m</i>	$\Delta H = \frac{G^2 * \mu * t}{\gamma}$	$\gamma$ = peso específico del agua $\mu$ = viscosidad dinámica $t$ = tiempo por cámara $G$ = gradiente	[14]	<i>Ec D.1</i>
Número de tabiques	<i>uni</i>	$Nt = \frac{V * t}{h}$	$V$ = velocidad $h$ = tirante $t$ = tiempo por cámara	[14]	<i>Ec D.2</i>
Pérdida de carga por el paso inferior	<i>m</i>	$hf = \frac{\Delta H}{Nt}$	$Nt$ = número de tabiques $\Delta H$ = pérdida de carga	[14]	<i>Ec D.3</i>
Tirante aguas abajo	<i>m</i>	$h_2 = h_1 - hf$	$h_1$ = tirante sobre la cresta $hf$ = pérdida de carga	[14]	<i>Ec D.4</i>
Sugerencia	-	$s = \frac{h_2}{h_1}$	$h_2$ = altura aguas abajo $h_1$ = tirante sobre la cresta	[14]	<i>Ec D.5</i>
Ancho del tabique	<i>m</i>	$B = \frac{Q}{1.84 * \alpha * h_1}$	$Q$ = caudal $h_1$ = tirante sobre la cresta $\alpha$ = coeficiente	[14]	<i>Ec D.6</i>
Separación entre tabiques	<i>m</i>	$e = \frac{Q}{V_2 * B}$	$Q$ = caudal $B$ = ancho del tabique $V_2$ = velocidad	[14]	<i>Ec D.7</i>
Área de los pasos inferiores	<i>m<sup>2</sup></i>	$Ao = \frac{Q}{Cd * \sqrt{2g * hf}}$	$Q$ = caudal $g$ = gravedad $hf$ = pérdida de carga $Cd$ = coeficiente de descarga	[14]	<i>Ec D.8</i>

## Continuación de la tabla 14

Altura del paso inferior	$m$	$a = \frac{A_o}{B}$	$B =$ ancho del tabique $A_o =$ área paso inferior	[14]	Ec D.9
Velocidad en el paso inferior	$\frac{m}{s}$	$V_3 = \frac{Q}{A_o}$	$Q =$ caudal $A_o =$ área paso inferior	[14]	Ec D.10
Radio hidráulico	$m$	$Rh = \frac{a * B}{2a + 2B}$	$B =$ ancho del tabique $a =$ altura paso inferior	[14]	Ec D.11
Gradiente instantáneo	$s^{-1}$	$G_{ins} = \sqrt{\frac{f * V_3^3}{8 * Rh * \nu}}$	$V_3 =$ velocidad paso inferior $Rh =$ radio hidráulico $\nu =$ viscosidad cinemática $f =$ coeficiente	[14]	Ec D.12
Caudal en los orificios para lodos	$m^3$	$Q_o = 0.05 * Q$	$Q =$ caudal	Ecuación empírica	Ec D.13

### 4.3 SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

La sedimentación es uno de los procesos de mayor interés en el área de la ingeniería ambiental, ya que la remoción de sólidos, propósito principal de esta operación, es esencial tanto en los tratamientos biológicos como en los fisicoquímicos del agua residual y de la potable. La necesidad de tratar cada vez mayores volúmenes de agua hace atractiva la idea de modificar las plantas existentes para aumentar su capacidad. En el caso de los sedimentadores, una buena opción es convertir los convencionales en los que se denominan de alta tasa, transformación relativamente fácil y económica que permite aumentar de tres a seis veces la producción de agua tratada [15].

Los sedimentadores de alta tasa o de alta rata son sedimentadores que se basan en la técnica de sedimentación gravitacional superficial con los cuales en un tiempo de detención o decantación de material sólido de más o menos 15 minutos, se observa una eficiencia comparable a la de un sedimentador rectangular convencional en donde el tiempo de detención por lo general es mayor a dos horas [16]. El tanque debe estar provisto de módulos de tubos circulares, cuadrados, hexagonales, octogonales, de placas planas paralelas, de placas onduladas o de otras formas, que deben colocarse inclinadas de modo que el agua ascienda por las celdas con flujo laminar. El diseño debe ser flexible para facilitar el retiro o el cambio de placas [13].

La figura 6 muestra la sección transversal y perfil de un sedimentador de alta tasa, donde se puede apreciar la configuración de las placas de asbesto cemento, los tubos de salida, los tubos de recolección de lodos y demás características propias de este tipo de sedimentadores.

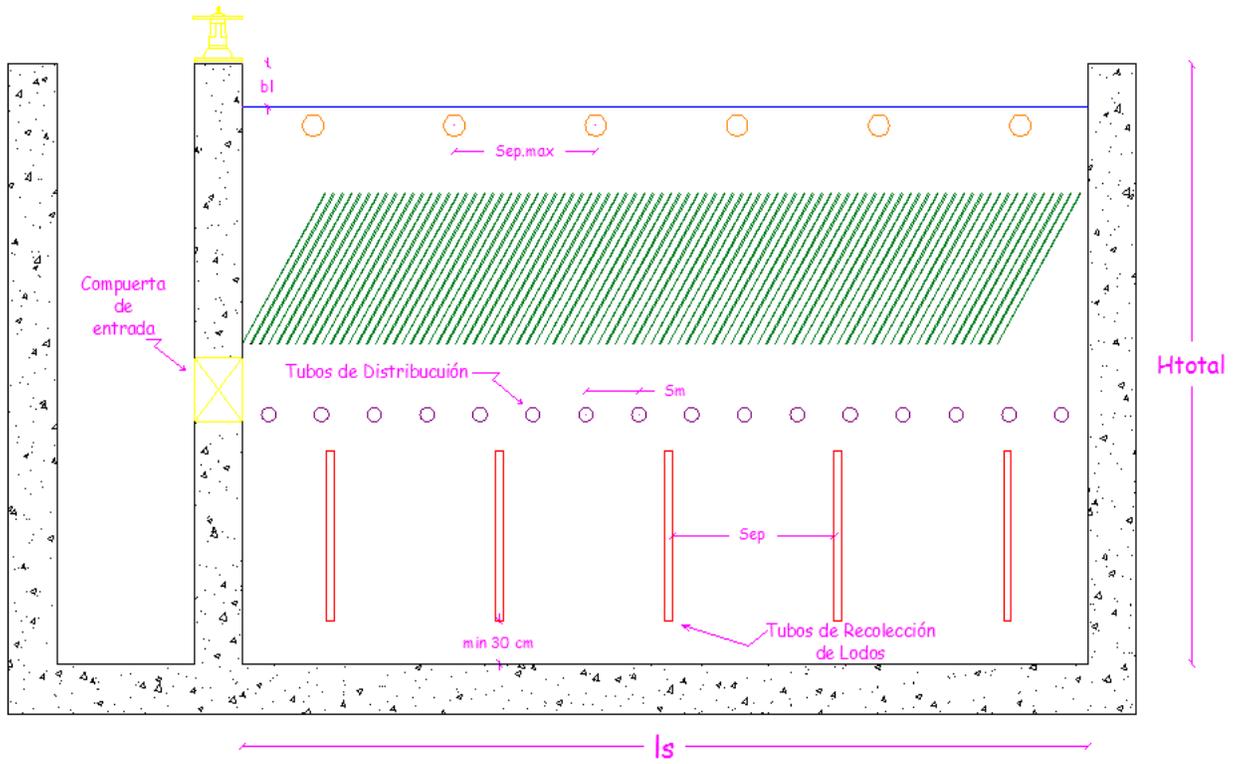
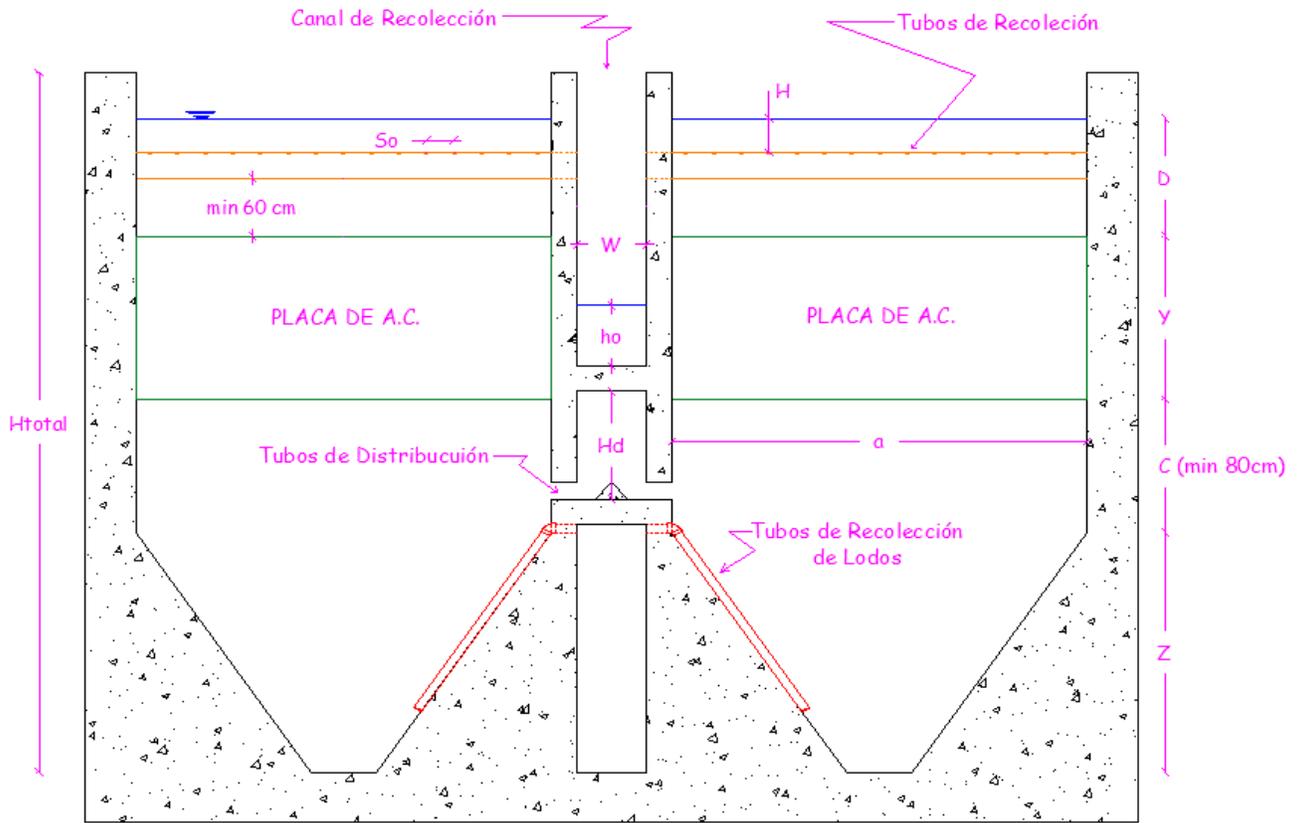


Figura 6. Sección transversal y perfil de un sedimentador de alta tasa

#### 4.3.1. Parámetros de diseño para el sedimentador de alta tasa

Para el diseño del sedimentador de alta tasa se deben tener en cuenta los parámetros de la tabla 15, entre los cuales se destaca el tiempo de retención, ya que se logra una importante disminución de este, comparado con los sedimentadores convencionales, donde el tiempo de retención es de mínimo 2 horas, mientras que en uno de alta tasa es de alrededor de 15 minutos.

**Tabla 15.** Parámetros de diseño para el sedimentador de alta tasa

Descripción	Rango	Fuente
Carga superficial (Placas angostas)	Entre 120 y 185 $m^3/(m^2 \cdot \text{dia})$	Ras 2000 título C
Carga superficial (Placas profundas)	Entre 200 y 300 $m^3/(m^2 \cdot \text{dia})$	Ras 2000 título C
Tiempo de retención (t)	Entre 10 y 15 minutos	Ras 2000 título C
Numero de Reynolds ( $Re$ )	Menor a 250	Ras 2000 título C
Profundidad (H)	Entre 4 y 5.5 m	Ras 2000 título C
Inclinación de las placas ( $\Theta$ )	Entre 55° y 60°	Ras 2000 título C
Separación entre placas (e)	Alrededor de 5 cm	Ras 2000 título C
Número de unidades	Mínimo 2	Ras 2000 título C
Velocidad en los tubos de evacuación de lodos ( $V_o$ )	Mayor a 3 m/s	[10]
Velocidad en el ducto de distribución ( $V$ )	Alrededor de 20 cm/s	[14]
Separación máxima entre tubos en el ducto de distribución	Máximo 1 m	[10]

La tabla 16 muestra las ecuaciones para el cálculo del sedimentador de alta tasa, las cuales arrojan resultados confiables, por lo cual el funcionamiento del sedimentador será muy semejante a lo que se implemente en el diseño.

**Tabla 16.** Ecuaciones para el cálculo del sedimentador de alta tasa

Cálculo	Unidad	Ecuación	Parámetros	Referencia	Numero
Altura de la placa inclinada	<i>m</i>	$y = h * \text{sen } \theta$	<i>h</i> = alto de la placa <i>θ</i> = inclinación de la placa	[1]	Ec E.1
Altura de la zona de lodos	<i>m</i>	$z = \tan \theta * l$	<i>θ</i> = inclinación de la placa <i>l</i> = ancho zona de lodos	[1]	Ec E.2
Altura total de sedimentador	<i>m</i>	$H_{total} = z + y + c + d + bl$	<i>z</i> = altura zona de lodos <i>y</i> = altura de placa inclinada <i>c</i> = altura zona de lodos-placa <i>d</i> = altura placa-nivel del agua <i>bl</i> = borde libre	[1]	Ec E.3
Velocidad promedio del fluido	$\frac{m}{s}$	$v_o = \frac{v_{sc} * \left( \text{sen}\theta + \frac{l}{e} \text{cos}\theta \right)}{1 + \frac{0.058 * e * v_{sc} \text{cos}\theta}{v}}$	<i>v<sub>sc</sub></i> = velocidad ascensional <i>e</i> = separación entre placas <i>v</i> = viscosidad dinámica <i>l</i> = alto de la placa <i>θ</i> = inclinación de la placa	[1]	Ec E.4
Carga superficial	$\frac{m}{s}$	$C_s = v_o \text{sen}\theta$	<i>v<sub>o</sub></i> = velocidad del flujo <i>θ</i> = inclinación de la placa	[1]	Ec E.5
Área superficial	<i>m</i> <sup>2</sup>	$A_T = \frac{Q}{v_o \text{sen}\theta} \left( 1 + \frac{e_p}{e} \right)$	<i>θ</i> = inclinación de la placa <i>Q</i> = caudal <i>v<sub>o</sub></i> = velocidad del flujo <i>e</i> = separación entre placas <i>e<sub>p</sub></i> = espesor de placa	[1]	Ec E.6
Número de placas	<i>uni</i>	$n = \frac{A_T \text{sen}\theta}{a(e + e_p)}$	<i>θ</i> = inclinación de la placa <i>e</i> = separación entre placas <i>e<sub>p</sub></i> = espesor de placa <i>A<sub>T</sub></i> = área superficial <i>a</i> = largo de la placa	[1]	Ec E.7

Continuación de la tabla 16

Longitud del sedimentador	$m$	$ls = \frac{n * e_p}{\text{sen}\theta} + \frac{n * e}{\text{sen}\theta} + h * \text{cos}\theta$	$\theta$ = inclinación de la placa $e$ = separación entre placas $e_p$ = espesor de placa $h$ = alto de la placa $n$ = numero de placas	[1]	Ec E.8
Número de Reynolds	-	$Re = \frac{v_o * e}{\nu}$	$\nu$ = viscosidad dinámica $v_o$ = velocidad del flujo $e$ = separación entre placas	Número de Reynolds	Ec E.9
Área del ducto de distribución	$m^2$	$A_{ducto} = \frac{Q}{v}$	$Q$ = caudal $v$ = velocidad en el ducto	[1]	Ec E.10
Radio hidráulico	$m$	$Rh = \frac{A}{P}$	$A$ = área mojada $P$ = perímetro mojado	[1]	Ec E.11
Gradiente instantáneo	$s^{-1}$	$G_{ins} = \sqrt{\frac{f * V_3^3}{8 * Rh * \nu}}$	$V_3$ = velocidad paso inferior $Rh$ = radio hidráulico $\nu$ = viscosidad cinemática $f$ = coeficiente	[1]	Ec E.12
Área de orificios de distribución	$m^2$	$A = \frac{\pi * \phi^2}{4}$	$\phi$ = diámetro del tubo recolector	[1]	Ec E.13
Número de orificios	-	$No = \frac{Q}{q}$	$Q$ = caudal $q$ = caudal por los orificios de distribución	[1]	Ec E.14
Separación entre orificios de distribución	$m$	$Sm = \frac{ls}{No}$	$ls$ = longitud del sedimentador $No$ = numero de orificios	[1]	Ec E.15
Relación longitud equivalente-diámetro tubo	-	$\frac{le}{\phi e}$	$le$ = longitud equivalente $\phi e$ = diámetro del tubo	[10]	Ec E.16

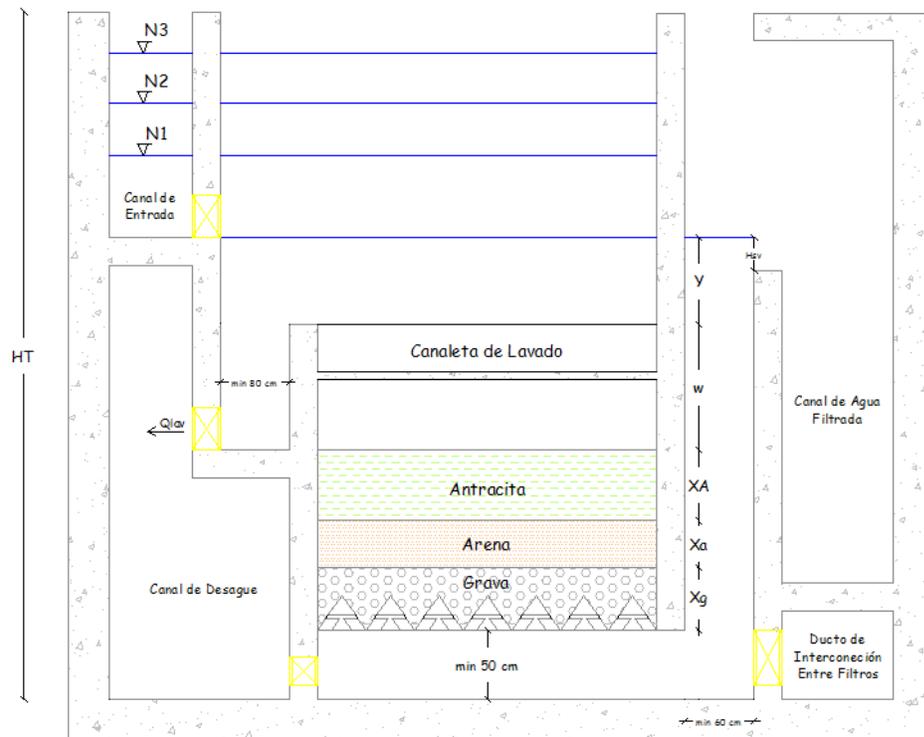
Continuación de la tabla 16

Caudal por los orificios de tubos recolectores	$m^3$	$q_o = Cd * A_o * \sqrt{2 * g * H}$	$Cd$ = coeficiente de descarga $g$ = gravedad $A_o$ = área del orificio $H$ = tirante sobre el tubo	[1]	Ec E.17
Velocidad en los tubos	$\frac{m}{s}$	$v_o = \frac{q_o}{A_o}$	$q_o$ = caudal por cada tubo $A_o$ = área del orificio	[1]	Ec E.18
Separación máxima entre tubos para la salida	$m$	$Sep_{max} = 1.5 * H$	$H$ = tirante sobre el tubo	[1]	Ec E.19
Número de tubos Para la salida de lodos	<i>uni</i>	$Nt = \frac{ls}{Sep_{max}}$	$ls$ = longitud del sedimentador $Sep_{max}$ = separación máxima	[1]	Ec E.20
Separación de los tubos de salida	$m$	$Sep = \frac{ls}{Nt}$	$ls$ = longitud del sedimentador $Nt$ = numero de tubos salida	[1]	Ec E.21
Diámetro de los tubos de recolección	$m$	$\phi = 1.25 * Q^{0.4}$	$Q$ = caudal	[1]	Ec E.22
Número de orificios en los tubos de recolección	-	$Notub = \frac{Q_{tubo}}{q_o}$	$Q_{tubo}$ = caudal por tubo $q_o$ = caudal por orificio	[14]	Ec E.23
Altura canal recolector de agua decantada	$m$	$h_o = \left( \frac{Q}{1.376 * W} \right)^{\frac{2}{3}}$	$Q$ = caudal $W$ = ancho del canal de recolección	[14]	Ec E.24

#### 4.4. FILTROS AUTOLAVANTES

La filtración remueve el material suspendido, medido en la práctica como turbiedad, compuesto de floc, suelo, metales oxidados y microorganismos. Aunque cerca del 90% de la turbiedad y el color son removidos por la coagulación y la sedimentación, una cierta cantidad de floc pasa al tanque de sedimentación y requiere su remoción, por ello, para lograr la clarificación final se usa la filtración a través de medios porosos; generalmente dichos medios porosos son arena o arena y antracita. El propósito principal de la filtración es remover la turbiedad e impedir la interferencia de la turbiedad con la desinfección, al proveer protección a los microorganismos de la acción de la desinfección [17]. En los sistemas de filtros de tasa declinante y autolavantes, la elección del número mínimo de unidades de filtración viene determinada por la necesidad de que el caudal de lavado requerido por un filtro pueda ser suministrado por los demás. Por esta razón, en general, debe haber por lo menos cuatro filtros [18].

La figura 7 muestra una sección transversal del filtro autolavante, en la cual se puede apreciar la configuración del lecho filtrante y los niveles que se presentan dentro del mismo.



**Figura 7.** Sección transversal de un filtro auto lavante

#### 4.4.1. Parámetros de diseño para el filtro autolavante

Uno de los parámetros más relevantes de la tabla 17, para el diseño de filtros con sistema autolavante, es el número de unidades filtrantes, ya que es necesario implementar un mínimo de cuatro unidades, para garantizar el auto lavado de las mismas, también es recomendable no sobrepasar la velocidad de filtración por día, ya que puede generar ciclos de lavado más cortos.

**Tabla 17.** Parámetros de diseño para el filtro autolavante

Ítem	Rango	Fuente	Descripción
Profundidad convencional del lecho filtrante	0.6 a 0.9 m	RAS 2000	El espesor de lecho que se vaya a utilizar, depende en gran parte, de la calidad de los materiales que lo componen y de la calidad del agua que se desea filtrar.
Velocidad de filtración recomendada	Mínimo 240- Máximo 300 $\frac{m^3}{m^2 \cdot dia}$	RAS 2000	Se establece un tope máximo de tasa de filtración, para evitar periodos de lavado más continuos.
pérdida de carga durante la carrera de filtración	Mínimo 2 m	RAS 2000	Se debe garantizar una pérdida mínima para tener seguridad a la hora de los procesos de filtrado y de lavado.
Número de unidades	Mínimo 4	RAS 2000	Se debe de tener un mínimo de cuatro unidades filtrantes, para que pueda funcionar como un sistema autolavante, de no implementarse este número de unidades se pueden presentar inconsistencias a la hora de efectuar el lavado de dichas unidades.

Además de los anteriores parámetros, es necesario tener en cuenta las características del lecho filtrante, que en este caso está compuesto de arena y antracita. En la tabla 18 están consignadas las características más importantes a tener en cuenta para ser implementadas en el diseño. Una información más completa de estas características se la encuentra en el RAS 2000 título C o en la norma técnica colombiana NTC 2572.

**Tabla 18.** Características para la arena y antracita

<b>Descripción</b>	<b>Arena</b>	<b>Antracita</b>
Tamaño Especifico (TE)	Entre 0.4 y 0.7 mm	Entre 0.6 y 0.8 mm
Gravedad Especifica (Gs)	Aprox. 2.65	Máximo 1.65
Porosidad (Po)	0.56 - 0.60	0.56 - 0.60
Coeficiente de uniformidad (CU)	1.5 a 1.7	1.4 a 1.8

En la siguiente tabla, se describen las ecuaciones que fueron implementadas para el cálculo de los filtros, las cuales generaran un diseño con un factor de seguridad alto, por lo cual se puede presentar una mayor altura en los filtros pero sin perder la eficiencia en el funcionamiento hidráulico de los mismos.

**Tabla 19.** Ecuaciones para el cálculo del filtro autolavante

Calculo	Unidad	Ecuación	Parámetros	Referencia	Numero
Relación espesor-tamaño efectivo	-	$\frac{TEare}{Xare} = \frac{TEant}{Xant}$	<p><math>TEare</math> = tamaño efectivo arena  <math>TEant</math> = tamaño efectivo antracita  <math>Xare</math> = espesor de la arena  <math>Xant</math> = espesor de la antracita</p>	[1]	Ec F. 1
Espesor del lecho	m	$El = Xare + Xant$	<p><math>Xare</math> = espesor de la arena  <math>Xant</math> = espesor de la antracita</p>	[1]	Ec F. 2
Número de Galileo	-	$Ga = \frac{g * (Gs - 1) * d_{90}^3}{v^2}$	<p><math>g</math> = gravedad  <math>Gs</math> = gravedad especifica  <math>d_{90}</math> = porcentaje pasa al 90%  <math>v</math> = viscosidad dinámica</p>	[1]	Ec F. 3
Velocidad de fluidificación	$\frac{m}{s}$	$Vasc = \frac{1.3 * v}{d_{90}} [(3.37^2 + 0.0408 * Ga)^2 - 33.7]$	<p><math>Ga</math> = numero de galileo  <math>d_{90}</math> = porcentaje pasa al 90%  <math>v</math> = viscosidad dinámica</p>	[1]	Ec F. 4
Abertura de capa medio	-	$d_i = \sqrt{d_1 * d_2}$	<p><math>d_1</math> = abertura primer tamiz  <math>d_2</math> = abertura segundo tamiz</p>	[1]	Ec F. 5
Numero de galileo(por capa)	-	$Ga = \frac{g * (Gs - 1) * d_i^3}{v^2}$	<p><math>g</math> = gravedad  <math>Gs</math> = gravedad especifica  <math>d_i</math> = abertura medio de capa  <math>v</math> = viscosidad dinámica</p>	[1]	Ec F. 6
Numero de Reynolds	-	$Re = \alpha * Ga^m$	<p><math>\alpha</math> = constante propia del material  <math>m</math> = constante propia del material</p>	[1]	Ec F. 7

Continuación tabla 19

Velocidad ascensional de lavado	$\frac{m}{s}$	$V_s = \frac{v * Re}{d_i}$	$d_i$ = abertura de tamiz $Re$ = Número de Reynolds $v$ = viscosidad dinámica	[1]	Ec F. 8
Porosidad del lecho expandido	-	$P_{exp} = \left( \frac{V_{asc}}{V_s} \right)^{\beta * Re^\theta}$	$\beta$ = constante propia del material $\Theta$ = constante propia del material $V_{asc}$ = velocidad de fluidificación $V_s$ = velocidad ascensional	[1]	Ec F. 9
Expansión relativa del lecho	$m$	$Ec = \frac{P_{exp} - P_o}{1 - P_{exp}}$	$P_{exp}$ = porosidad lecho expandido $P_o$ = porosidad	[1]	Ec F. 10
Longitud expandida parcial por capa	$m$	$\Delta Lc = Ec * x * X$	$Ec$ = expansión relativa del lecho $x$ = porcentaje material por capa $X$ = espesor lecho arena -antracita	[1]	Ec F. 11
Expansión del total lecho	$m$	$Ex = \frac{E_a * X_a + E_A * X_A}{X_a + X_A}$	$X_a$ = espesor de la arena $X_A$ = espesor de la antracita $E_a$ = expansión de la arena $E_A$ = expansión de la antracita	[1]	Ec F. 12
Área de filtración	$m^2$	$Af = \frac{Q}{q_o}$	$Q$ = caudal $q_o$ = tasa media de filtración	[1]	Ec F. 13
Área de cada filtro	$m^2$	$Acf = \frac{Af}{N}$	$Af$ = Área de filtración $N$ = número de filtros	[1]	Ec F. 14
Caudal de lavado	$m^3$	$Q_{lav} = Af * V_{asc}$	$Af$ = Área de filtración $V_{asc}$ = Velocidad de fluidificación	[1]	Ec F. 15

Continuación tabla 19

Ancho del filtro	$m$	$B = 0.625 * L$	$L =$ Largo del filtro	[1]	Ec F. 16
Largo del filtro	$m$	$L = \sqrt{\frac{Af}{0.625}}$	$Af =$ Área de filtración	[1]	Ec F. 17
Altura de viga e soporte de lecho	$m$	$H_{vig} = \frac{L}{14}$	$L =$ Largo del filtro	[20]	Ec F. 18
Numero de orificios por viga	-	$No = \frac{L}{Sep} * 2$	$L =$ Largo del filtro $Sep =$ separación entre orificios	[1]	Ec F. 19
Caudal por orificio	$m^3$	$q_{ori} = \frac{Q_{lav}}{No}$	$Q_{lav} =$ Caudal de lavado $No =$ orificios por viga	[1]	Ec F. 20
Tirante en la canaleta de lavado	$m$	$h_{can} = \left[ \frac{Q_{lav}}{1.376 * b} \right]^{\frac{2}{3}}$	$Q_{lav} =$ Caudal de lavado $b =$ ancho de la canaleta	[1]	Ec F. 21
Tirante sobre la canaleta de lavado	$m$	$h_v = \left[ \frac{Q_{ver}}{1.84 * l_v} \right]^{\frac{2}{3}}$	$Q_{ver} =$ Caudal de vertimiento $l_v =$ longitud de la canaleta	[1]	Ec F. 22
Pérdida de carga por los orificios	$m$	$h_{ori} = \frac{q_{ori}^2}{Cd^2 * A_o^2 * 2g}$	$q_{ori} =$ caudal por orificio de viga $Cd =$ coeficiente de descarga $A_o =$ área orificio de la viga $g =$ gravedad	[1]	Ec F. 23
Pérdida de carga en la grava	$m$	$h_g = \frac{V_{asc} * X_g}{3}$	$V_{asc} =$ Velocidad de fluidificación $X_g =$ espesor del lecho de grava	[1]	Ec F. 24
Pérdida de carga en el lecho filtrante	$m$	$h_{fil} = (Gs - 1) * L_o * (1 - P_o)$	$Gs =$ densidad especifica $L_o =$ espesor del lecho $p_o =$ porosidad del material	[1]	Ec F. 25

Continuación tabla 19

Total de pérdidas por lavado	$m$	$Y = h_{ori} + hg + h_{fil} + h_v$	$h_{ori}$ = pérdida de carga en orificios $hg$ = pérdida de carga en la grava $h_v$ = Tirante sobre la canaleta $h_{fil}$ = pérdida de carga en el lecho	[1]	Ec F. 26
tramo lecho filtrante-borde superior canaleta	$m$	$w = Ex + ec + h_{can} + bl$	$Ex$ = expansión total del lecho $ec$ = espesor fondo de la canaleta $h_{can}$ = tirante en la canaleta $bl$ = borde libre en la canaleta	[1]	Ec F. 27
Pérdida de carga en el lecho por filtración	$m$	$h_0 = \frac{5 \cdot v}{g} \cdot \frac{(1 - P_0)^2}{P_0^3} \cdot \frac{36}{Ce^2} \cdot Lo \cdot \left( \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i^2} \right) \cdot q$	$v$ = viscosidad dinámica $p_0$ = porosidad del material $g$ = gravedad $Ce$ = coeficiente propio del material $Lo$ = espesor de arena o antracita $q$ = tasa de filtración $X_i$ = retenido entre dos mallas $d_i$ = abertura de tamiz	[1]	Ec F. 28
Caudal sobre el vertedero	$m^3$	$Q_{sv} = Q_{planta} - Q_{lav}$	$Q_{planta}$ = Caudal de la planta $Q_{lav}$ = Caudal de lavado	[1]	Ec F. 29
Longitud equivalente	$m$	$le = l - 0.2 \cdot h_{sv}$	$l$ = longitud del vertedero $h_{sv}$ = tirante sobre el vertedero de salida	[1]	Ec F. 30
Tirante sobre el vertedero de salida	$m$	$h_{sv} = \left[ \frac{Q_{sv}}{1.84 \cdot le} \right]^{\frac{2}{3}}$	$Q_{sv}$ = Caudal sobre el vertedero $le$ = longitud equivalente	[1]	Ec F. 31
Pérdida de carga en la grava por filtrado	$m$	$h_{0gra} = \frac{V_{fil} \cdot L_{gra}}{3}$	$V_{fil}$ = velocidad de filtración $L_{gra}$ = espesor de grava	[1]	Ec F. 32

Continuación tabla 19

Pérdida de carga en las vigas por filtrado	$m$	$h_{orificio} = \frac{\left(\frac{Q_{fil}}{No}\right)^2}{Cd^2 * Ao^2 * 2g}$	$Q_{fil}$ = caudal de filtración $No$ = numero de orificios $Cd$ = coeficiente de descarga $Ao$ = área del orificio $g$ = gravedad	[1]	Ec F. 33
Altura total del filtro	$m$	$H_t = h_1 + h_2 + w + Y + h_{sv} + Kh_o + \frac{h_c}{N} + b$	$h_1$ = tramo fondo-borde inferior viga $h_2$ = espesor de grava+ arena + antracita $w$ = tramo lecho filtrante-borde superior canaleta $Y$ = Total de pérdidas por lavado $h_{sv}$ = Tirante sobre el vertedero de salida $K$ = coeficiente(2) $h_o$ =pérdidas de carga de la grava + arena + antracita + orificios de vigas $h_c$ = altura entre 1.8 y 2.5 metros $N$ = numero de filtros $b$ = borde libre	[14]	Ec F. 34
Área compuerta de entrada	$m^2$	$Ae = \frac{\left(\frac{Q}{N}\right)}{Ve}$	$Q$ = caudal $N$ = numero de filtros $Ve$ = velocidad de entrada (0.40 m/s)	[1]	Ec F. 35
Área compuerta de lavado	$m^2$	$As = \frac{Q_{lav}}{Vs}$	$Q_{lav}$ = caudal de lavado $Vs$ = velocidad de salida (1 m/s)	[1]	Ec F. 36

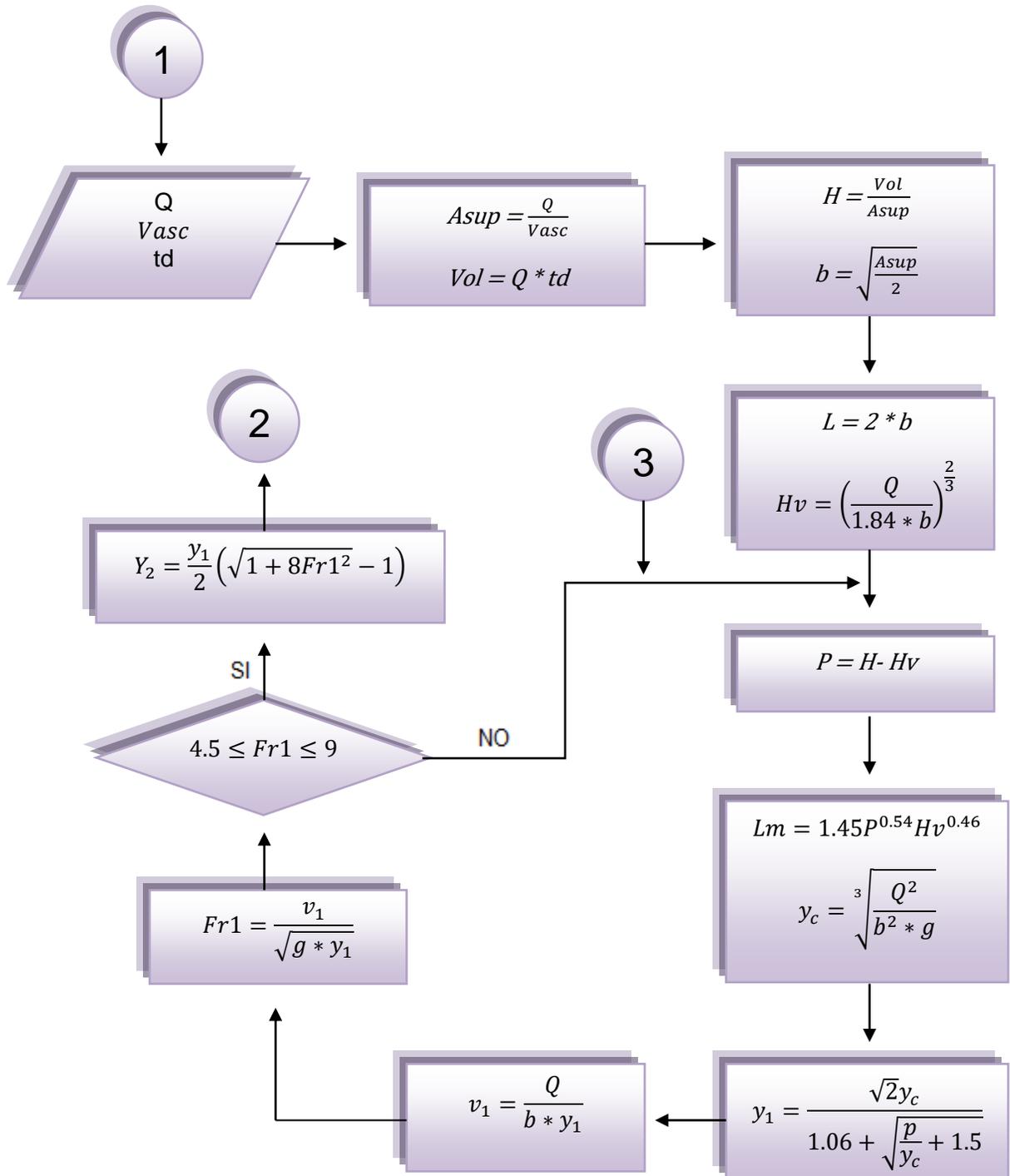
#### **4.5. DIAGRAMAS DE FLUJO DE LOS SISTEMAS HIDRÁULICOS**

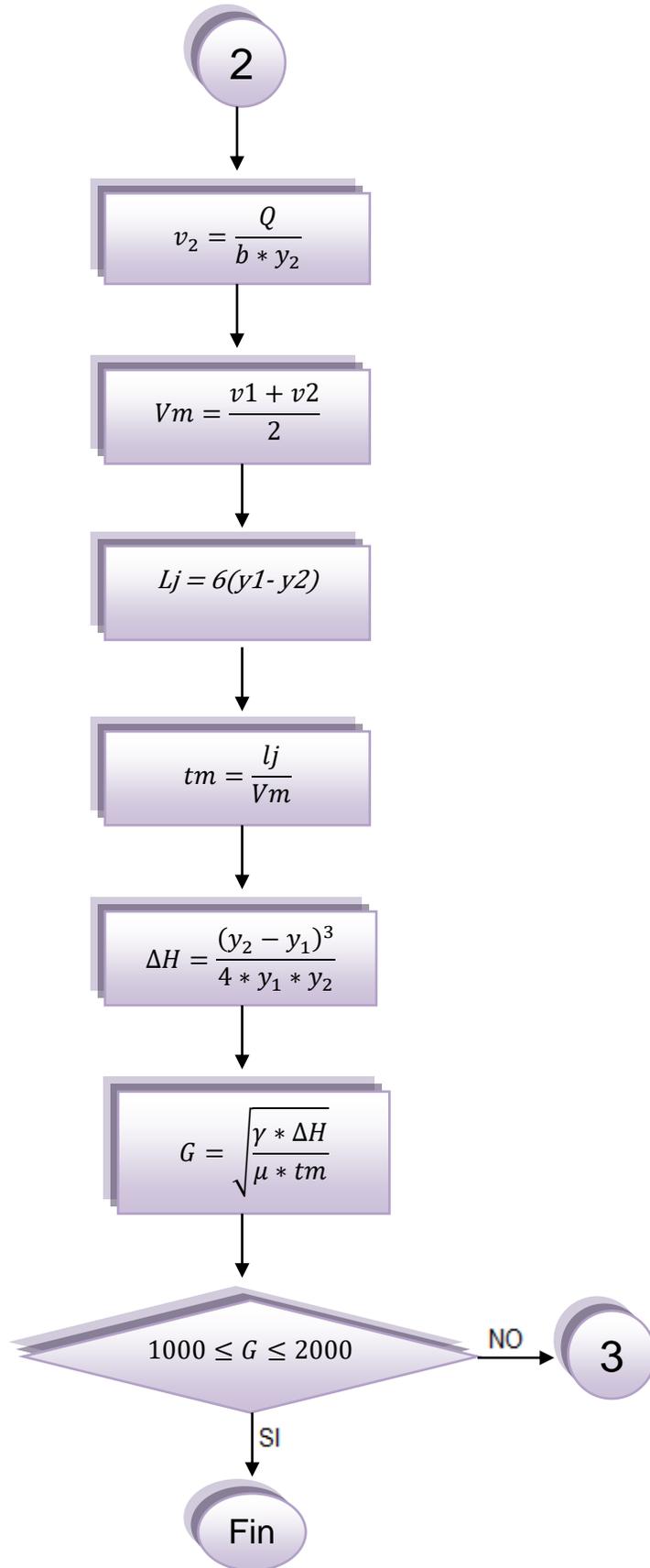
Los diagramas de flujo, como su nombre lo indica, son diagramas que emplean símbolos gráficos para representar los pasos o etapas de un proceso. También permiten describir la secuencia de los distintos pasos o etapas y su interacción [19]. En este caso, se utilizan para representar el proceso de cálculo que se empleó en el diseño de cada uno de los sistemas hidráulicos mencionados en los anteriores ítems, todo esto para darle a conocer al usuario los algoritmos, procesos y ecuaciones que el software emplea para hacer el cálculo de estos elementos que conforman la planta de tratamiento de agua.

En este tipo de diagramas se pueden apreciar algunas formas geométricas, las cuales desempeñan funciones diferentes como por ejemplo, los círculos marcan el inicio, interrupción o fin de un ciclo. Los trapecios son utilizados para dar a conocer los parámetros o variables que se requieren para iniciar los cálculos, luego siguen los rectángulos en los que se consignan las ecuaciones en las que serán usados los datos ingresados y por último están los rombos que según la condición que contengan dividen o finalizan el proceso de cálculo.

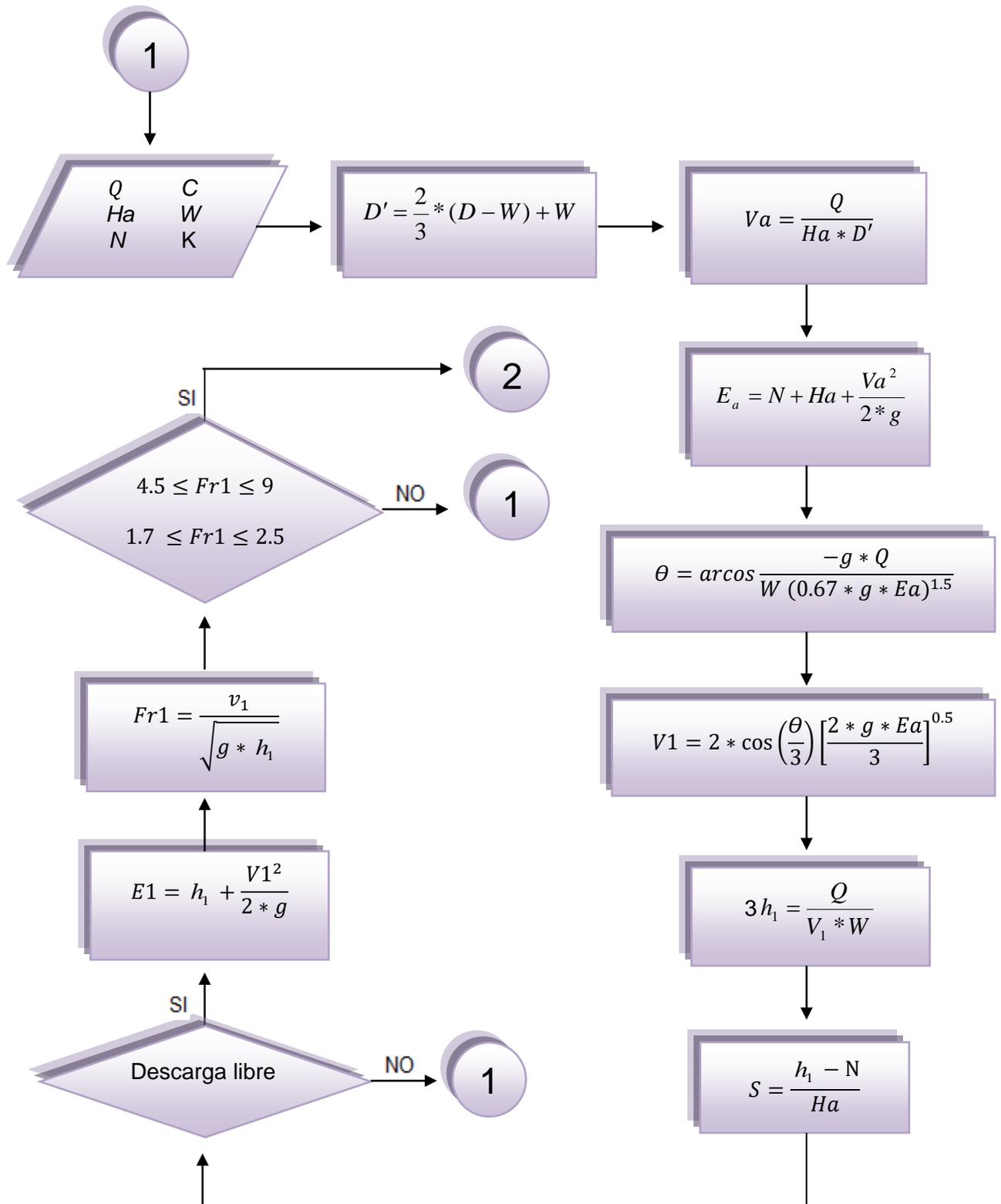
A continuación se presenta los diagramas de flujo de los diferentes sistemas hidráulicos que se implementaron en este trabajo de grado.

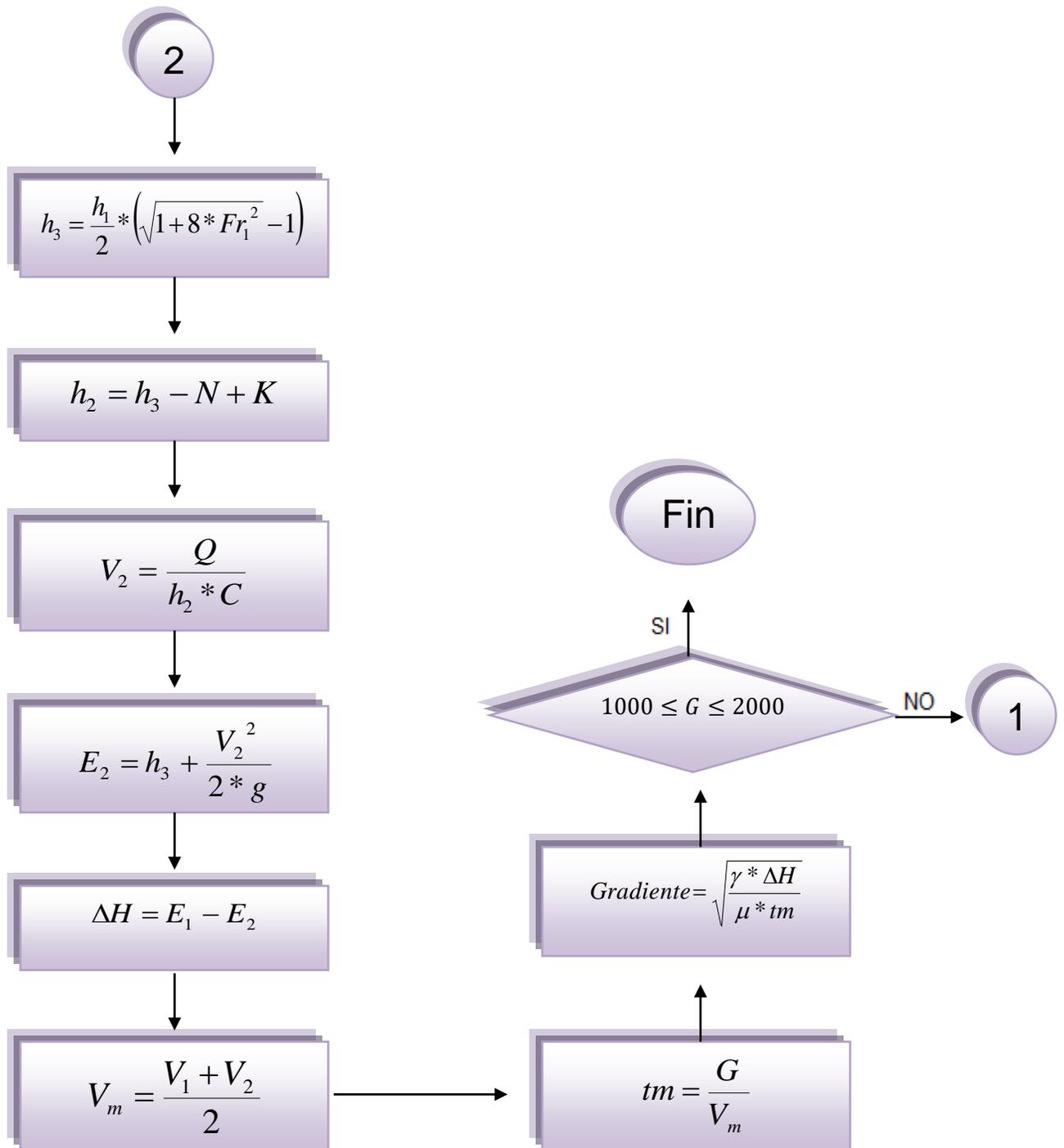
#### 4.5.1. Diagrama de flujo del mezclador rápido con vertedero rectangular



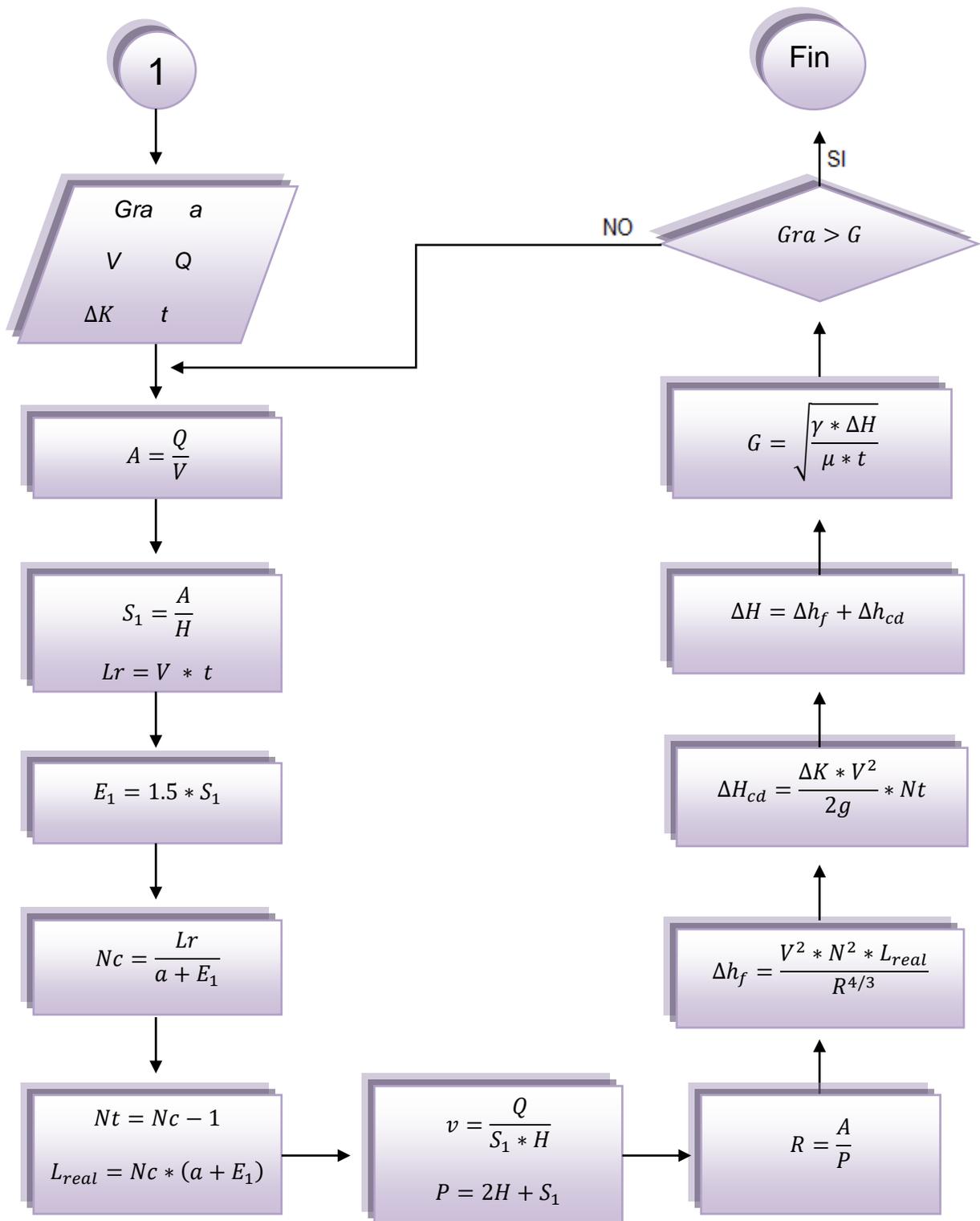


## 4.5.2. Diagrama de flujo para el dimensionamiento de la canaleta Parshall

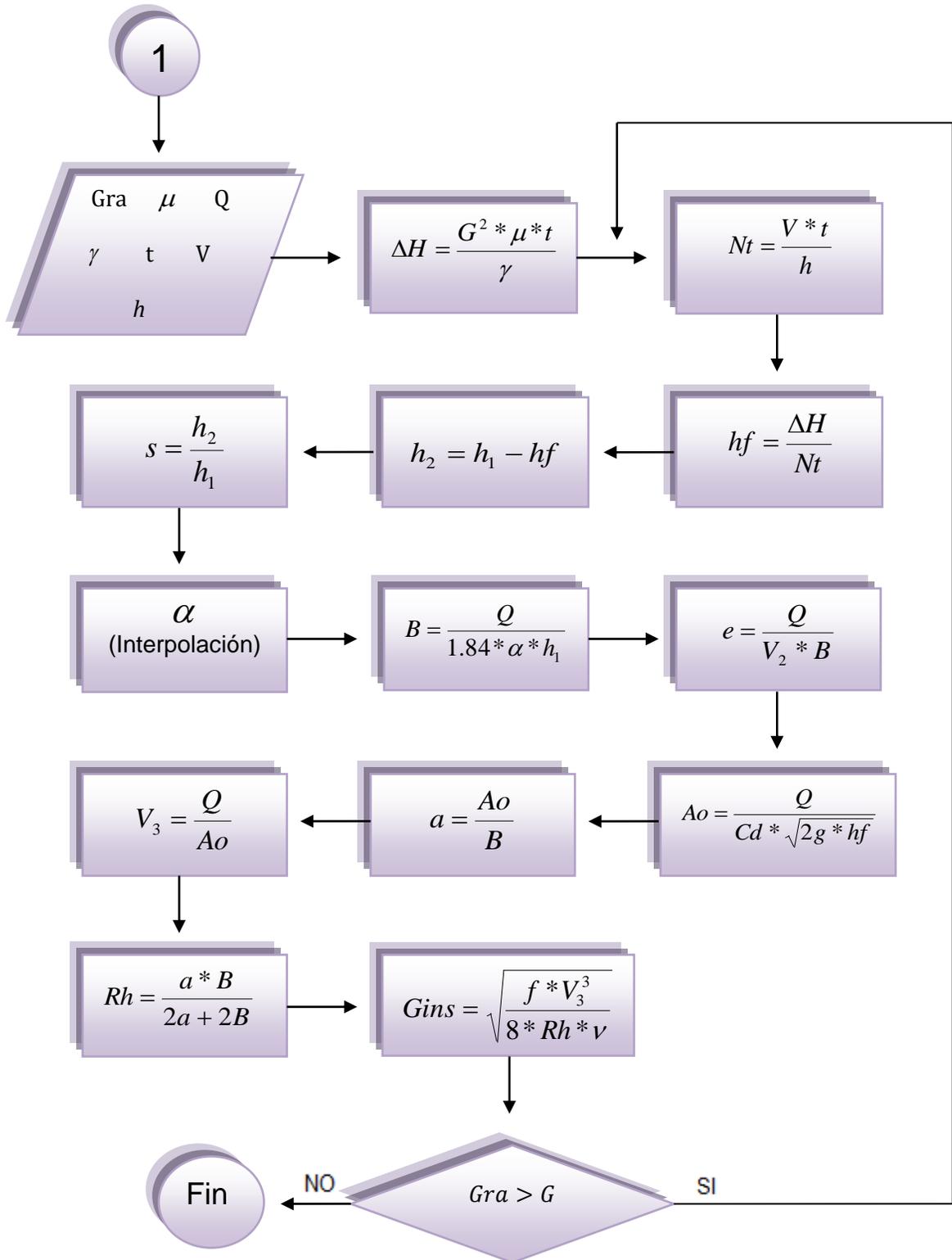




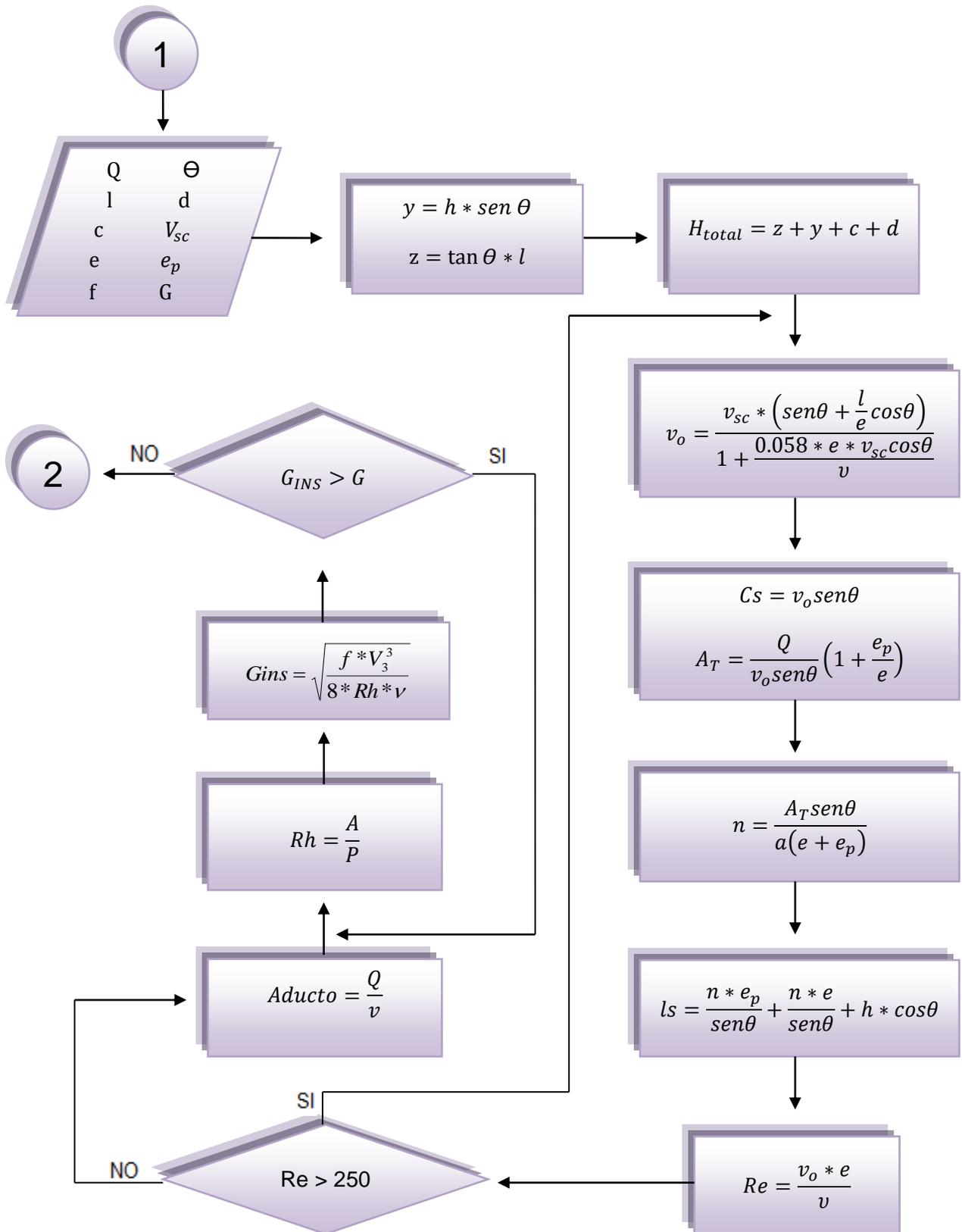
## 4.5.3. Diagrama de flujo para el floculador hidráulico de flujo horizontal

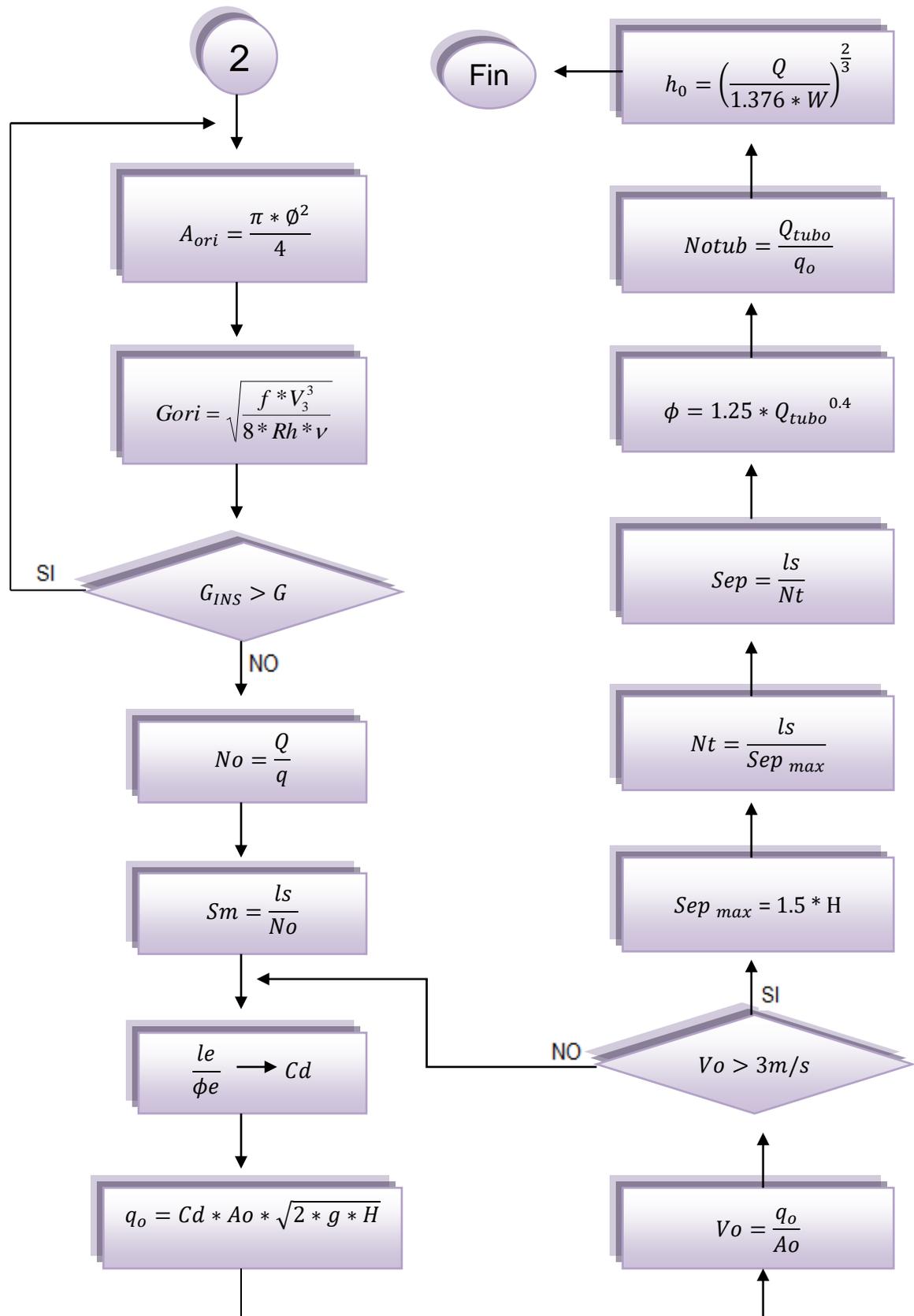


#### 4.5.4. Diagrama de flujo para el floculador hidráulico de flujo vertical

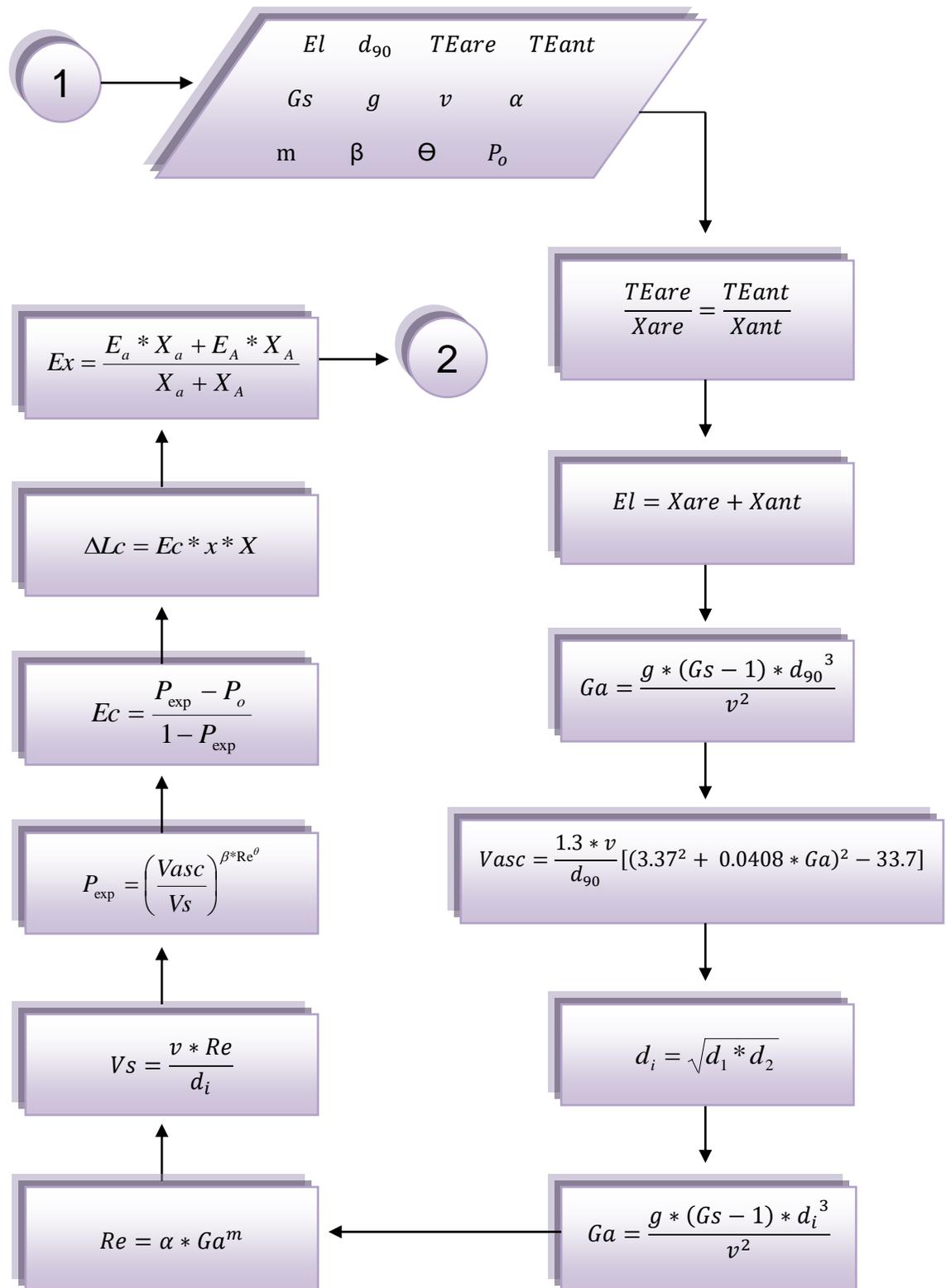


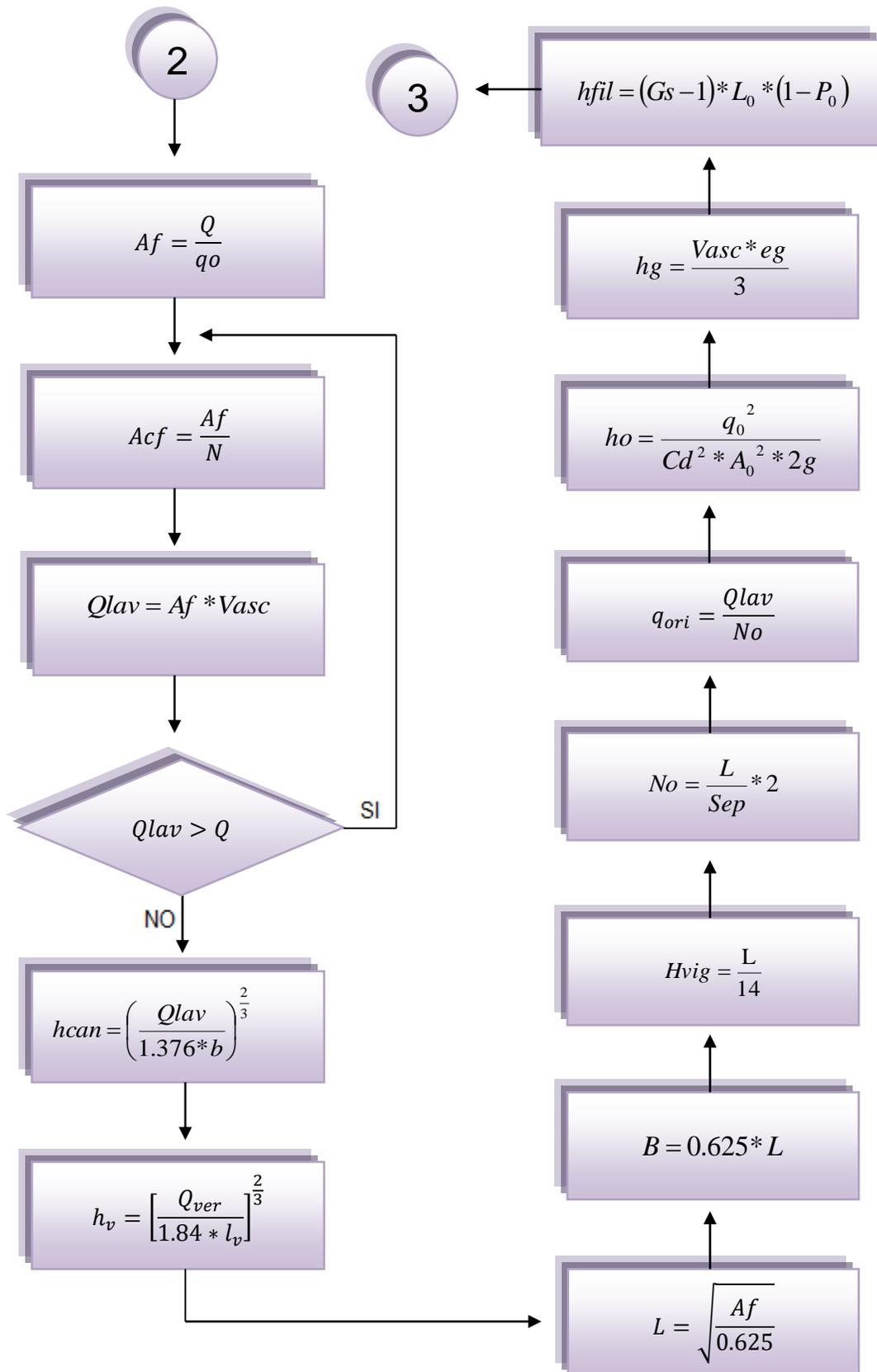
4.5.5. Diagrama de flujo para el sedimentador de alta tasa

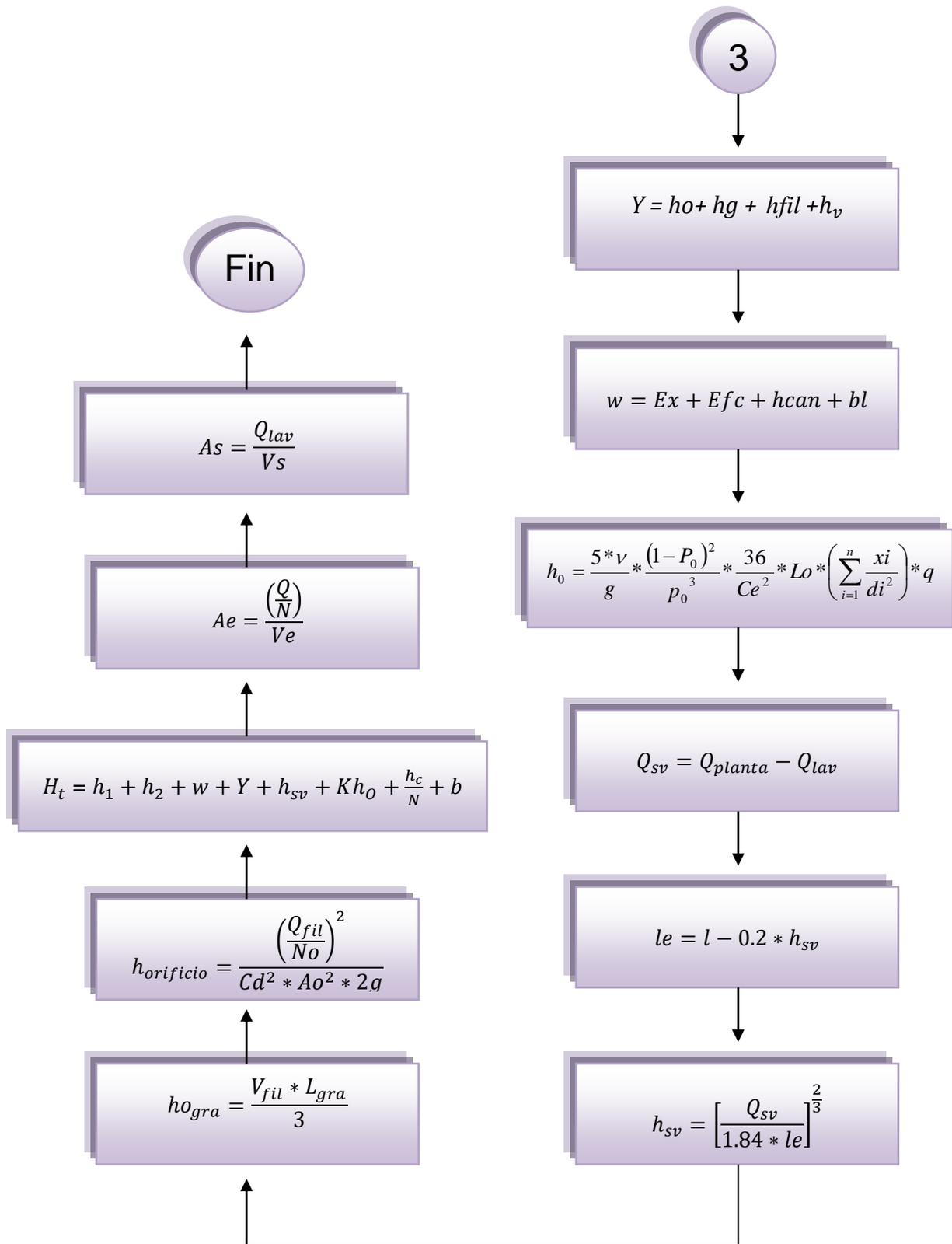




## 4.5.6. Diagrama de flujo para el filtro autolavante







## 5. ESTRUCTURA DE LA APLICACIÓN DESARROLLADA

Este capítulo describe el diseño de la aplicación desarrollada a nivel interno y su progreso basado en los requerimientos funcionales, además se explicará brevemente la codificación implementada, para concluir con algunas utilidades que le facilitarán al usuario el manejo de este software.

### 5.1. DISEÑO GRÁFICO DE LAS VENTANAS DE LA APLICACIÓN

Al ejecutar el software, la primera ventana que se puede apreciar, es la de información general acerca de programa (ver Figura 8), la cual desaparece automáticamente para iniciar el menú principal (ver Figura 9) donde se puede elegir el sistema hidráulico a calcular, una vez ingresado los datos generales.



**Figura 8.** Ventana de inicio del software



**Figura 9.** Ventana del menú principal

Los sistemas hidráulicos que se pueden apreciar en la figura 9 hacen parte de una planta de potabilización de agua convencional, la cual está compuesta por: mezclador rápido, mezclador lento, sedimentador y filtro. En este software el usuario puede elegir, en el caso del mezclador lento, entre un resalto hidráulico generado por un vertedero rectangular o por una canaleta Parshall y en el caso de un mezclador lento podrá elegir entre un floculador de flujo horizontal o vertical, según el caudal que desee tratar. A través de los botones del lado izquierdo de la figura 9 se puede acceder a cada una de las siguientes ventanas, una vez ingresado los datos generales dando clic en el botón "ok", en la misma figura.

**CAMARA DE AQUIETAMIENTO**

Menu Principal Ver

**Datos Generales**

Velocidad Ascensional  m/s

Tiempo de Detención  seg

Espesor de Muros  m

Espesor Pantalla  m

**Resultados**

Ancho  m

Largo  m

Profundidad  m

Gradiente  s-1

N° Fr

**Calculos**

**Figura 10.** Ventana del mezclador rápido con vertedero rectangular

**MEZCLADOR CON CANALETA PARSHALL**

Menu Principal Ver

**Datos Generales**

Dimensiones Canaleta

Velocidad Ascensional  m/seg

Tiempo de Detención  Seg

Espesor de Muros  m

Tramo Camara-Canaleta  m

Longitud Canal  m

**Resultados**

Ancho  m

Largo  m

Alto  m

Gradiente  s-1

N° de Froude

**Calculos**

**Figura 11.** Ventana del mezclador rápido con canaleta Parshall

**FLOCULADOR DE FLUJO HORIZONTAL**

Menu Principal Ver

**Datos Generales**

Tirante  m

Tiempo Óptmo  m

Número de Cámaras  Uni

Espesor de Muros  m

**Dimensiones de Tabiques**

Espesor  m

Largo  m

Ancho  m

**Gradiente de Cámara**

G camara1  s-1

G camara2  s-1

G camara3  s-1

G camara4  s-1

**Calculos**

**Figura 12.** Ventana del mezclador lento de flujo vertical

**FLOCULADOR DE FLUJO VERTICAL**

Menu Principal Ver

**Datos Generales**

Tirante  m

Tirante en la cresta  m

Tiempo de Detención  m

Número de Cámaras  Uni

Espesor de Tabiques  m

Espesor de Muros  m

**Gradiente y Velocidad de Cámara**

V.camara1  m/s G camara1  s-1

V.camara2  m/s G camara2  s-1

V.camara3  m/s G camara3  s-1

V.camara4  m/s G camara4  s-1

**Calculos**

**Figura 13.** Ventana del mezclador lento de flujo vertical

**SEDIMENTADOR DE ALTA TASA**

Menu Principal Ver

**Datos Generales**

Inclinación de Placa  grados

Vsc  m/d

Separación de Placas  m

Número de Sedimentadores  Uni

Numero de Hileras  Uni

**Datos de Placas y Muros**

largo  m

ancho  m

espesor  m

Muros Externos  m

Muros Internos  m

**Datos Ducto Distribuidor**

Velocidad  m/s

Área de cuña  m<sup>2</sup>

Ancho Ducto  m

Diametro  Pul

**Datos Zona de Lodos**

Inclinacion Tubo  grados

Diametro Tubo  Pul

Separación Fondo  m

**Calculos**

**Figura 14.** Ventana del sedimentador de alta tasa

**FILTRO AUTOLAVANTE**

Menu Principal Ver

**Datos Generales**

Tasa Filtrante  m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d

Espesor de lecho  m

Expansión del lecho  m

Espesor de grava  m

Ancho Canaleta  m

Espesor muros externos  m

Espesor muros internos  m

**Datos Arena**

D90  mm

Gs

Po  mm

TE  mm

Xi/di2

**Datos Antracita**

D90  mm

Gs

Po  mm

TE  mm

Xi/di2

**Canaleta de Lavado**

Canaleta individual

Canaleta doble empotrada

Canaleta doble

**Calculos**

**Figura 15.** Ventana del filtro autolavante

Al ingresar a cada una de estas ventanas, se podrá dimensionar completamente el sistema hidráulico deseado, obteniendo así, en cada uno de estos su respectiva memoria de cálculos acompañado del plano en planta en formato dxf. Para mayor información acerca del modo de ejecución del software dirigirse al manual de usuario en el anexo A.

## 5.2. CÓDIGO IMPLEMENTADO EN LA APLICACIÓN

La codificación para esta aplicación fue desarrollada en el lenguaje de programación de Visual Basic 6.0, ya que su ambiente completamente gráfico, permite desarrollar más fácilmente interfaces graficas que otros entornos de programación como C++. En este apartado solo se consignarán las partes de código más importantes, si se desea conocer la totalidad del código dirigirse al anexo B (CD de la aplicación).

### 5.2.1. Código utilizado en el cálculo de los sistemas hidráulicos

Para el cálculo de cada uno de estos sistemas, se pasó a código, las ecuaciones mencionadas en el anterior capítulo, siendo necesario en alguno de estos, implementar algoritmos de interpolación o ciclos para el cálculo de algunas variables, como fue el caso del gradiente hidráulico y velocidad de cámara, en los sistemas hidráulicos de mezcla lenta. A continuación se describe el código implementado para calcular el floculador de flujo horizontal.

En la primera parte del siguiente código se dimensionan las variables que se van a utilizar, según el tipo de valor que almacenen, luego se les asigna el valor a cuya caja de texto corresponda, para empezar un ciclo de iteraciones que permita calcular el resto de variables, que dependen de las que ingreso el usuario, para finalmente imprimir estos valores en cajas de texto y en un archivo de memoria de cálculos.

#### Option Explicit

**Dim** V(4), a(4), L(4), S1(4), G(4), E1(4), Ntabi(4), Lr(4), Vc(4), R(4), PerT(4) **As Single**  
**Dim** dif, td, Nc, i, j, Bl, Ncan(4), H, mu, et, lar, c1, cor, Lm, lm2, lm3, Lm4, z **As Single**

#### Private Sub camara\_Click()

```
H = Val(txtH)
mu = Val(txtmuro)
et = Val(txtespesor)
anchoT = Val(txtancho)
td = Val(txtd)
```

```

lar = Val(txtlargo)
z = Combo1.ListIndex
If z = 0 Then
    Nc = 2
End If
If z = 1 Then
    Nc = 3
End If
If z = 2 Then
    Nc = 4
End If

```

**End Sub**

**Private Sub Iblcalculos\_Click()**

```

For i = 1 To Nc
    dif = Val(txtG(i))
    V(i) = 0.1

    While Not G(i) > dif - 1 And G(i) < dif + 1
        V(i) = V(i) + 0.001
        a(i) = Q / V(i)
        BI = anchoT - H
        S1(i) = Round(a(i) / H, 2)
        L(i) = V(i) * (td / Nc) * 60
        E1(i) = 1.5 * S1(i)
        Ncan(i) = ((L(i) / (2.4 + E1(i))) + 0.51) \ 1
        Ntabi(i) = Ncan(i) - 1

        If Ntabi(i) Mod 2 = 0 Then
            Ntabi(i) = Ntabi(i)
            Ncan(i) = Ncan(i)
        Else
            Ntabi(i) = Ntabi(i) + 1
            Ncan(i) = Ncan(i) + 1
        End If

        Lr(i) = Ncan(i) * (2.4 + E1(i))
        Vc(i) = Q / (S1(i) * H)
        R(i) = a(i) / (S1(i) + (2 * H))
        Hf(i) = (Vc(i) ^ 2) * (0.012 ^ 2) * Lr(i) / (R(i) ^ (4 / 3))
        Hcd(i) = 3 * (Vc(i) ^ 2) * Ntabi(i) / 19.6
        PerT(i) = Hf(i) + Hcd(i)
    End While

```

```

        G(i) = ((peso * PerT(i)) / (visdin * (td / Nc) * 60)) ^ (1 / 2)
        If G(i) > 75 Then
            MsgBox "el G no puede ser calculado "
        End If
    Wend
Next
End Sub

```

### 5.2.2. Código utilizado para la creación de planos en planta

Una de las cosas más complejas que se realizó en este proyecto de grado, fue la creación de planos en planta por parte de la aplicación desarrollada, ya que se generó un archivo .dxf, cuya estructura es muy compleja, porque en este, el software AutoCAD consigna toda la información generada por su entorno de trabajo, que puede ser fácilmente de diez mil líneas de texto.

El dibujo de los planos se logra a través de una serie de coordenadas que genera el software, luego de haber realizado el respectivo cálculo de la hidráulica de cada una de las partes que conforman la planta, todas estas coordenadas son unidas mediante líneas o rectángulos para ir conformando parte por parte la estructura final del sistema hidráulico.

El código realizado para la creación de archivos .dxf es el siguiente:

#### Dim bf As Integer, nObjeto As Long

```

bf = FreeFile: Open "C:\Plantas\planos\Caquietamiento.dxf" For Output As #bf

Print #bf, " 0"
Print #bf, "SECTION"
Print #bf, " 2"
Print #bf, "HEADER"
Print #bf, " 0"
Print #bf, "ENDSEC"
Print #bf, " 0"
Print #bf, "SECTION"
Print #bf, " 2"
Print #bf, "TABLES"
Print #bf, " 0"
Print #bf, "TABLE"
Print #bf, " 2"
Print #bf, "LAYER"
Print #bf, " 70"
Print #bf, "    " & 0 'Número de capas

```

```

Print #bf, " 0"
Print #bf, "ENDTAB"
Print #bf, " 0"
Print #bf, "ENDSEC"
Print #bf, " 0"
Print #bf, "SECTION"
Print #bf, " 2"
Print #bf, "ENTITIES"

nObjeto = 1

LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + lar + pant + Lm + Lj, 0, 0, 0
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", 0, 0, 0, 2 * mu + anch
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", 0, 2 * mu + anch, mu + lar + pant + Lm + Lj
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + lar + pant + Lm + Lj, 2 * mu + anch, mu
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + lar + pant + Lm + Lj, mu + anch, mu
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + 0, mu + anch, mu + 0, mu + 0
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + 0, mu + 0, mu + lar + pant + Lm + Lj, mu
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + lar + pant + Lm + Lj, mu + 0, mu + lar
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + lar, mu + 0, mu + lar, mu + anch
LineaAutocadDXF bf, nObjeto, "0", mu + lar + pant, mu + 0, mu + lar + pant, mu

Dim C As rCoordenada

C.x = mu + 0
C.Y = 2 * mu + anch + 0.7
TextoAutocadDXF bf, nObjeto, "Ejemplo", "CAMARA DE AQUIETAMIENTO", C

Print #bf, " 0"
Print #bf, "ENDSEC"
Print #bf, " 0"
Print #bf, "EOF"

```

**Close bf**

La línea de código "LineaAutocadDXF" es creada en un módulo del programa, el cual contiene información que puede ser usada por todos los formularios, además están dimensionadas otros "comandos" tales como texto (TextoAutocadDXF) y poli línea (PolilineaAutocadDXF). El comando línea presenta la siguiente codificación:

**Sub LineaAutocadDXF**

```

If x1 = x2 And y1 = y2 And z1 = z2 Then Exit Sub
nObjeto = nObjeto + 1

Print #bf, " 0"

```

```

Print #bf, "LINE"
Print #bf, " 5"
Print #bf, CStr(nObjeto)
Print #bf, " 8"
Print #bf, Capa
Print #bf, " 10" 'x
Print #bf, CStr(x1)
Print #bf, " 20" 'y
Print #bf, CStr(y1)
Print #bf, " 30" 'z
Print #bf, CStr(z1)
Print #bf, " 11" 'x
Print #bf, CStr(x2)
Print #bf, " 21" 'y
Print #bf, CStr(y2)
Print #bf, " 31" 'z
Print #bf, CStr(z2)

```

### **End Sub**

El anterior código corresponde al plano en planta, en formato .dxf, de la cámara de aquietamiento con vertedero rectangular, la codificación de los demás sistemas hidráulicos es igual, solo se modifican las coordenadas de dibujo.

### **5.2.3. Código utilizado para la creación memorias de cálculo**

Además de la visualización de resultados a través de cajas de texto, el software permite obtener una memoria de cálculo por medio de un archivo de texto plano, lo cual hace que el usuario pueda guardar los resultados finales que obtuvo. La siguiente estructura de código corresponde a la memoria de cálculos generada para el mezclador rápido con canaleta Parshall.

#### **Private Sub mnumemorial\_Click()**

```

Open "C:\Plantas\archivos\CanaletaParshall.txt" For Output As #1
Print #1, "MEMORIA DE CALCULOS CÁMARA DE AQUIETAMIENTO
CON CANALETA PARSHALL"
Print #1, ""
Print #1, "DATOS INGRESADOS:"
Print #1, ""
Print #1, " Caudal de diseño = " & Q & " " & "m3/s"
Print #1, " Temperatura = " & tem & " " & "°C"
Print #1, " Velocidad ascensional = " & Val(txtvel) & " " & "m/s"
Print #1, " Tiempo de detención = " & Val(txttiem) & " " & "s"
Print #1, ""

```

```

Print #1, "DIMENSIONES DE LA CANALETA:"
Print #1, ""
Print #1, "  W(m)  A(m)  B(m)  C(m)  D(m)  E(m)  L(m)  G(m)
K(m)  M(m)  N(m)  P(m)  X(m)  Y(m)"
Print #1, "  " & W(i) & "  " & a(i) & "  " & B(i) & "  " & C(i) & "  " & D(i) & "  "
& e(i) & "  " & L(i) & "  " & G(i) & "  " & K(i) & "  " & M(i) & "  " & N(i) & "  "
& p(i) & "  " & x(i) & "  " & Y(i)
Print #1, ""
Print #1, "RESULTADOS:"
Print #1, ""
Print #1, "  Área superficial = " & Area & " " & "m2"
Print #1, "  Volumen de la cámara = " & vol & " " & "m3"
Print #1, "  Alto = " & alto & " " & "m"
Print #1, "  Ancho = " & anch & " " & "m"
Print #1, "  Largo = " & lar & " " & "m"
Print #1, "  Numero de Froude = " & Fr
Print #1, "  Peso específico = " & peso & " " & "N/m3"
Print #1, "  Viscosidad dinámica = " & visdin & " " & "N.s/m2"
Print #1, "  Gradiente hidráulico = " & Gra & " " & "s-1"

```

**Close #1**

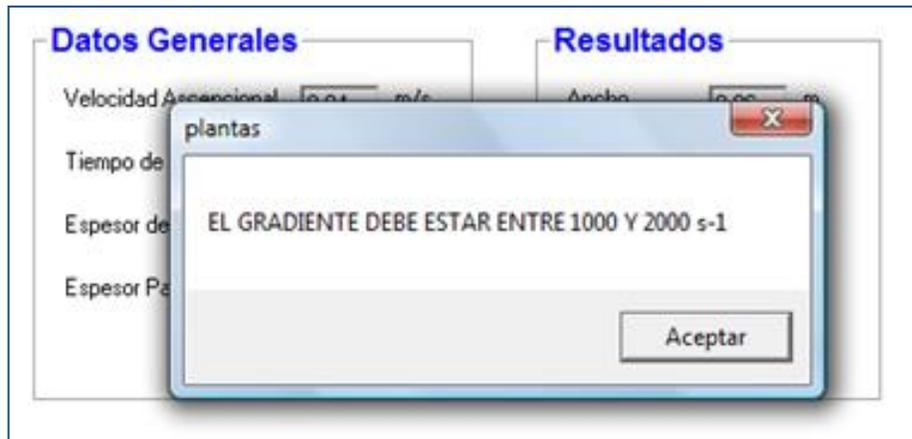
**Shell "notepad C:\Plantas\archivos\CanaletaParshall.txt", vbNormalFocus**

**End Sub**

Una vez creado el archivo y ubicación del mismo, se le ingresan los datos a través de la función "PRINT", la cual almacena las variables para poder ser visualizadas por medio de la función "SHELL".

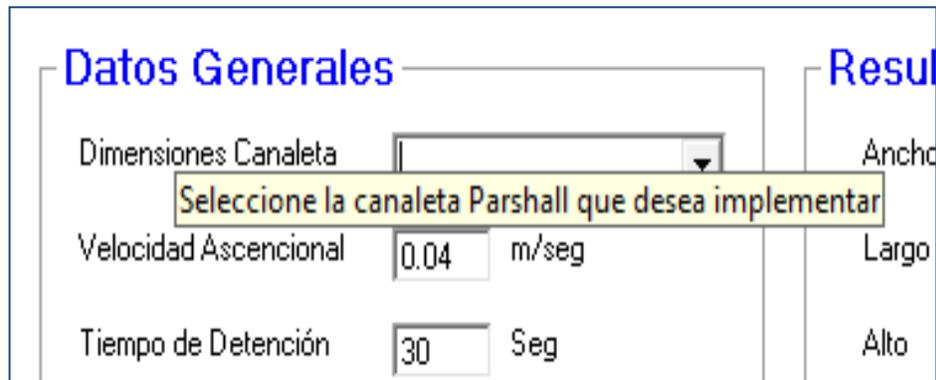
### 5.3. UTILIDADES Y AYUDAS DE LA APLICACIÓN

Para facilitar la comprensión y manejo del software, se han creado ayudas visuales que le informan al usuario cuando está obteniendo resultados fuera de rangos no recomendados o no permitidos, además ofrece interfaces para la correcta introducción de datos en las cajas de textos, logrando así una aplicación fácil de entender y manejar.



**Figura 16.** Cuadros de ayuda al usuario

Un ejemplo de estas ayudas se puede apreciar en la figura 16, la cual aparece cuando el valor calculado del gradiente hidráulico está fuera del rango, que según la norma Ras 2000 debe de estar entre 1000 a 2000 segundos a la menos uno ( $s^{-1}$ ).



**Figura 17.** Textos de ayuda al usuario

Al colocar el cursor sobre la zona de ingreso de datos aparece, en algunas cajas de texto, un mensaje con información que da una mayor noción acerca del valor que debe ser ingresado.

## 6. CÁLCULOS ADICIONALES

En este apartado hace mención de las unidades hidráulicas que no son calculadas por parte del software, que son necesarias para completar el proceso de potabilización, además se expresan los cálculos adicionales que debe hacer el usuario para poder asignarle valor a las variables solicitadas.

### 6.1. SISTEMAS HIDRÁULICOS NO CALCULADOS

Entre los sistemas hidráulicos no calculados se encuentran: el sistema de dispersión de coagulante y la cámara de contacto de cloro, el primero no fue implementado por el software, debido a la variedad de diseños que se pueden realizar para la dispersión de coagulantes y se ha dejado que el diseñador implemente el que más se ajuste a las condiciones deseadas. El segundo sistema se ha dejado para trabajos futuros, junto con las vistas en perfil y sección transversal de los sistemas hidráulicos escogidos.

Además no se calculan sistemas opcionales, que pueden estar o no, en una planta de tratamiento, como la utilización de carbón activado y sistemas de dispersión de cal, para el ajuste del PH u otros sistemas de adición de aditivos, como complemento al tratamiento del agua.

### 6.2. CÁLCULOS ADICIONALES POR PARTE DEL USUARIO

Si se desea realizar un diseño con mayor exactitud, se recomienda realizar los respectivos ensayos relacionados con las características agua, entre los cuales están: la prueba de jarras, turbiedad, color, entre otros. Por ejemplo en el sistema de mezcla lenta, es necesario realizar estas pruebas para determinar el tiempo óptimo de detención y el gradiente promedio de mezcla, que son muy relevantes para obtener una adecuada mezcla. En el diseño del sedimentador de alta tasa, se debe realizar el cálculo con anterioridad de la velocidad de sedimentación ( $V_{sc}$ ), la cual se obtiene al realizar una serie de gráficos con los datos provenientes de la prueba de jarras modificada.

Finalmente para el cálculo del filtro autolavante el diseñador, deberá realizar el cálculo de la expansión del lecho filtrante, para lo cual deberá tener en cuenta las características físicas y químicas del lecho combinado de arena y antracita junto con la grava de soporte. Un ejemplo en particular de estos cálculos y variables, a tener en cuenta, se encuentran consignados en las tablas 20 y 21.

**Tabla 20.** Expansión del lecho de arena

#Tamiz	d1(cm)	d2(cm)	di(cm)	di <sup>2</sup>	Ga	Re	Vs	$\beta^*Re^\theta$	Pe	Ec	Xi	Xi/di <sup>2</sup>	$\Delta Lc$
40 - 30	0,042	0,059	0,05	0,0025	1640	32,47	7,21	0,25	0,61	0,33	0,336	134,4	0,042
30 - 20	0,059	0,084	0,07	0,0049	4502	56,9	9,02	0,28	0,54	0,21	0,381	77,8	0,03
20 - 16	0,084	0,168	0,1	0,01	13124	103,08	11,44	0,31	0,47	0,09	0,283	28,3	0,0097
<b>Total</b>												240,5	0,0817

**Tabla 21.** Expansión del lecho de antracita

#Tamiz	d1(cm)	d2(cm)	di(cm)	di <sup>2</sup>	Ga	Re	Vs	$\beta^*Re^\theta$	Pe	Ec	Xi	Xi/di <sup>2</sup>	$\Delta Lc$
30 - 20	0,059	0,084	0,07	0,0049	1228	21,36	3,39	0,25	0,74	0,77	0,355	72,45	0,142
20 - 16	0,084	0,119	0,1	0,01	3579	41,17	4,57	0,26	0,68	0,44	0,373	37,3	0,085
16 - 12	0,119	0,168	0,141	0,0199	10033	77,47	6,1	0,28	0,61	0,18	0,272	13,7	0,025
<b>Total</b>												123,45	0,252

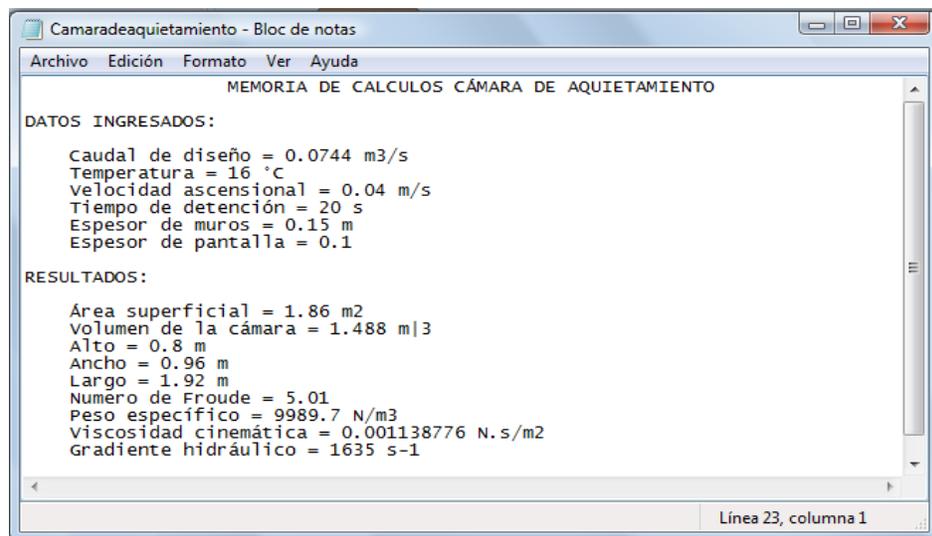
Una vez realizado el cálculo de las variables, consignadas en las anteriores tablas el diseñador puede empezar el diseño del filtro autolavante.

## 7. PRUEBAS Y RESULTADOS

Una vez finalizado el complejo proceso de programación y diseño de todas las partes o interfaces del software, se procedió a realizar las diferentes pruebas, teniendo en cuenta diferentes parámetros, tales como caudal, temperatura del agua y demás parámetros propios de cada sistema hidráulico. Cada prueba consistió en el ingreso de datos en las cajas de texto de cada sistema hidráulico, luego se verificaron los resultados de las memorias de cálculo arrojados por parte del software, con cálculos realizados manualmente o sin ayuda del programa, para finalizar con la verificación de las medidas o dimensiones de los planos en planta. Este procedimiento se repitió con diferentes datos, obteniendo resultados satisfactorios en cada una de estas pruebas, comprobando así la eficacia y versatilidad del *software*. A continuación se muestra uno ejemplos de los resultados arrojados por parte del software.

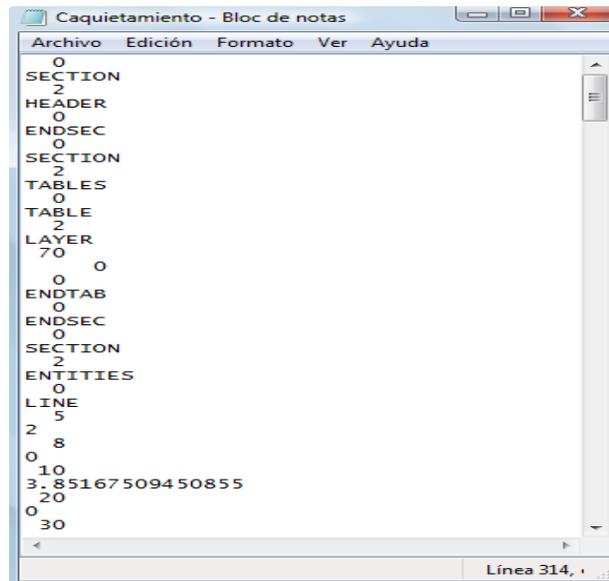
### 7.1. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL MEZCLADOR RÁPIDO CON VERTEDERO RECTANGULAR.

Los resultados finales arrojados por el *software*, comprenden una memoria de cálculo (ver figura 18) contenida en un archivo de texto con extensión .txt, en el cual se guardan los cálculos más importantes que realizó este programa, lo cual da a conocer al usuario el proceso que se llevó a cabo para llegar a dichos resultados.



**Figura 18.** Memoria de cálculo para el mezclador rápido con vertedero rectangular

Un vez realizado el proceso de cálculo, de las variables de los sistemas hidráulicos, el software procede a generar un archivo con extensión .dxf, como se puede apreciar parte de él, en la figura 19, el cual contiene una determinada codificación o instrucciones para que puedan ser leídas por el programa AutoCAD, que luego de haber cargado este archivo generará el dibujo o plano en planta (ver figura 20) del sistema hidráulico a quien pertenezca.

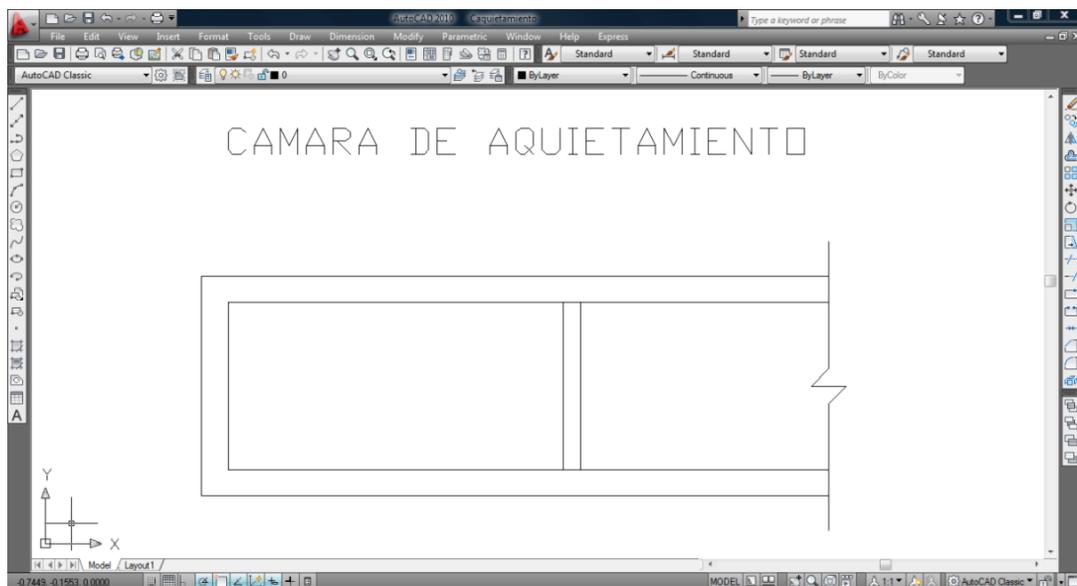


```

Archivo  Edición  Formato  Ver  Ayuda
0
SECTION
2
HEADER
0
ENDSEC
0
SECTION
2
TABLES
0
TABLE
2
LAYER
70
0
0
ENDTAB
0
ENDSEC
0
SECTION
2
ENTITIES
0
LINE
5
2
8
0
10
3.85167509450855
20
0
30
Línea 314,

```

**Figura 19.** Archivo DXF

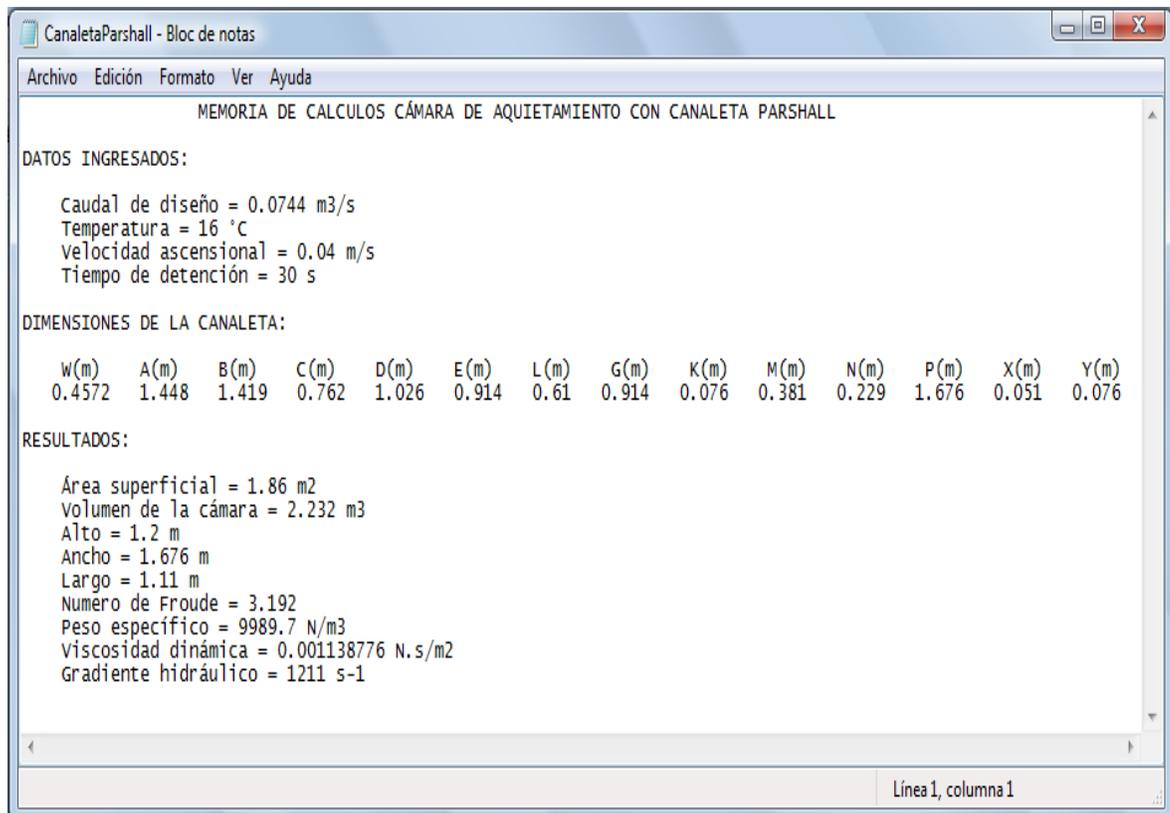


**Figura 20.** Plano en planta para el mezclador rápido con vertedero rectangular

En la anterior figura se puede apreciar, que el dibujo de la cámara no se encuentra acotado, esto es debido a que es muy complicado colocar este acotamiento, ya que un archivo con extensión .dxf, que es el que utiliza este software, tiene miles de líneas y el depurarlas para conseguir el acotamiento es muy complejo, pero el acotar el dibujo es muy sencillo para el usuario, ya que las dimensiones de este son las reales y basta con darle acotar en el menú de herramientas para poder visualizar las medidas.

## 7.2. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL MEZCLADOR RÁPIDO CON CANALETA PARSHALL

La figura 21 indica los resultados que se obtuvieron para el mezclador rápido con canaleta Parshall, en el cual se puede apreciar, entre otras cosas, las dimensiones estándar de la canaleta escogida, para la cual se le realizó el cálculo de su hidráulica, para revisar si parámetros como el gradiente y número de Froude estaban dentro de los rangos permitidos.



**Figura 21.** Memoria de cálculo para el mezclador rápido con canaleta Parshall

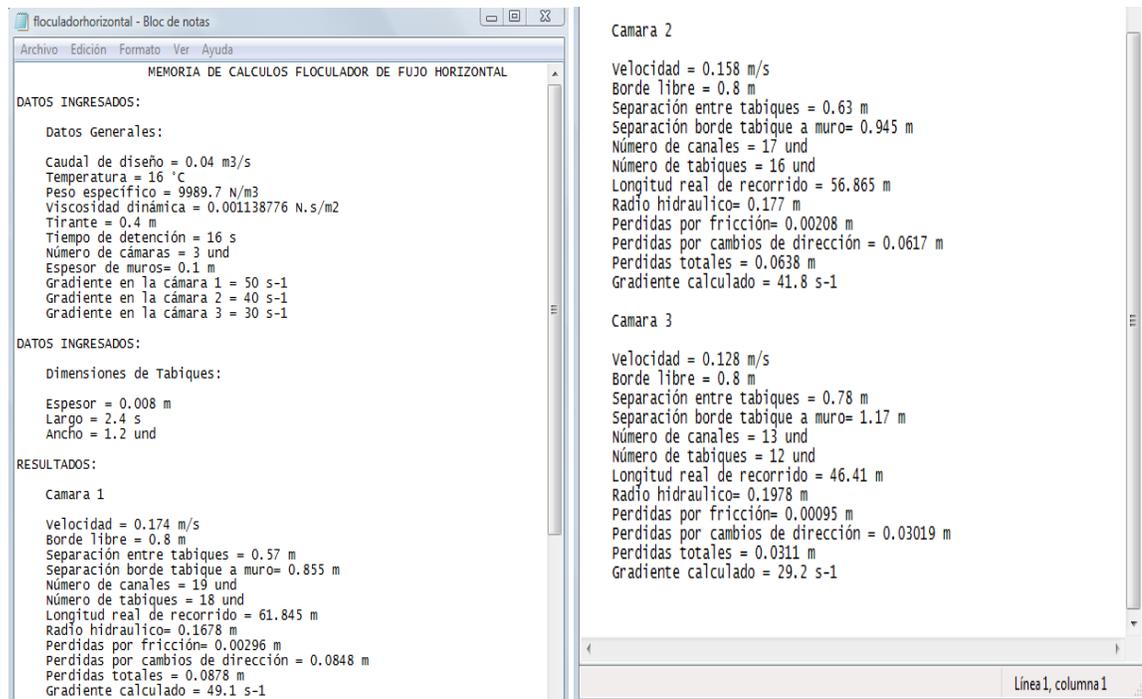
Luego de esto podemos observar, en la figura 22, el plano o dibujo generado para estos datos, en el cual se puede apreciar, la vista en planta de la cámara de quietamiento, luego hay un tramo de separación y por último se encuentra la canaleta Parshall con las dimensiones estándar elegidas.



**Figura 22.** Plano en planta para el mezclador rápido con canaleta Parshall

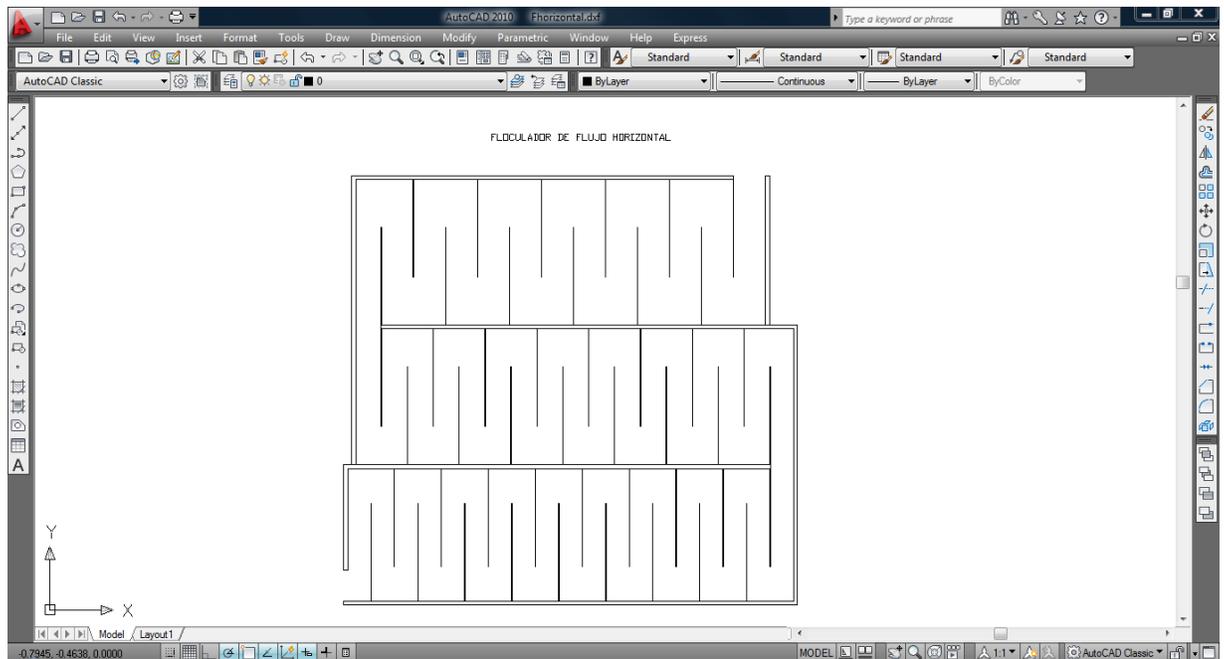
### 7.3. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO HORIZONTAL

Los resultados consignados en la figura 23, corresponden a un mezclador lento de flujo horizontal, en el cual se utilizaron un numero de 3 cámaras y un caudal de 40 litros por segundo (menor a 50 L/s, tal y como recomienda el RAS 2000).



**Figura 23.** Memoria de cálculo para el mezclador lento de flujo horizontal

El dibujo de estas 3 cámaras, se las puede apreciar en la siguiente figura, las cuales contienen unos tabiques con las dimensiones que fueron elegidas por el usuario y posteriormente el software hizo el cálculo del número y separación de los mismos.

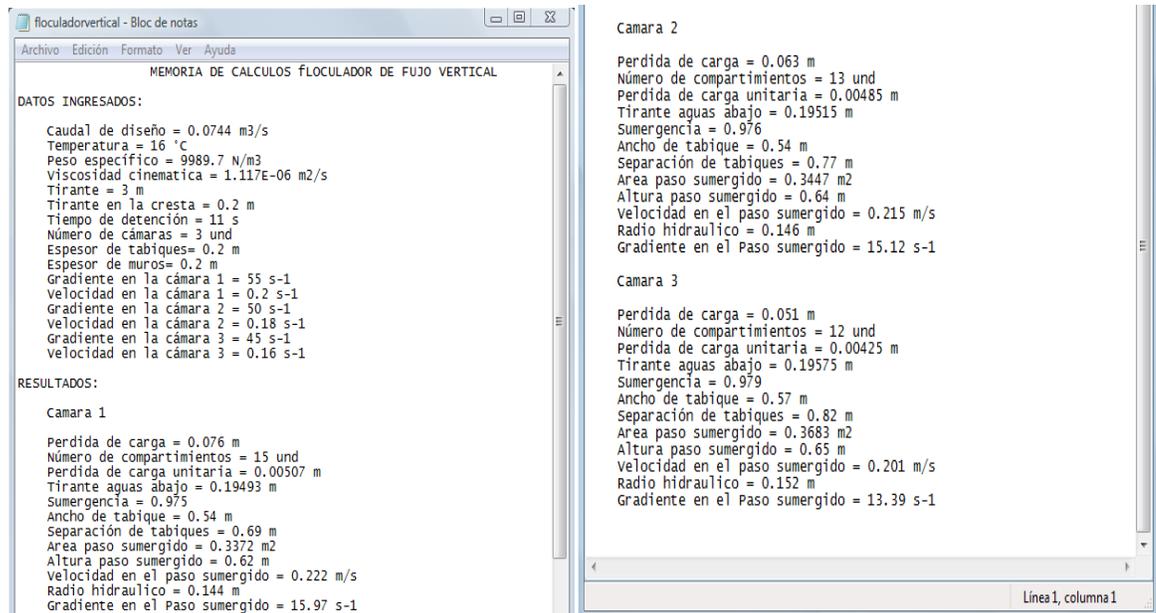


**Figura 24.** Plano en planta para el mezclador lento de flujo horizontal

#### **7.4. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL FLOCULADOR HIDRÁULICO DE FLUJO VERTICAL**

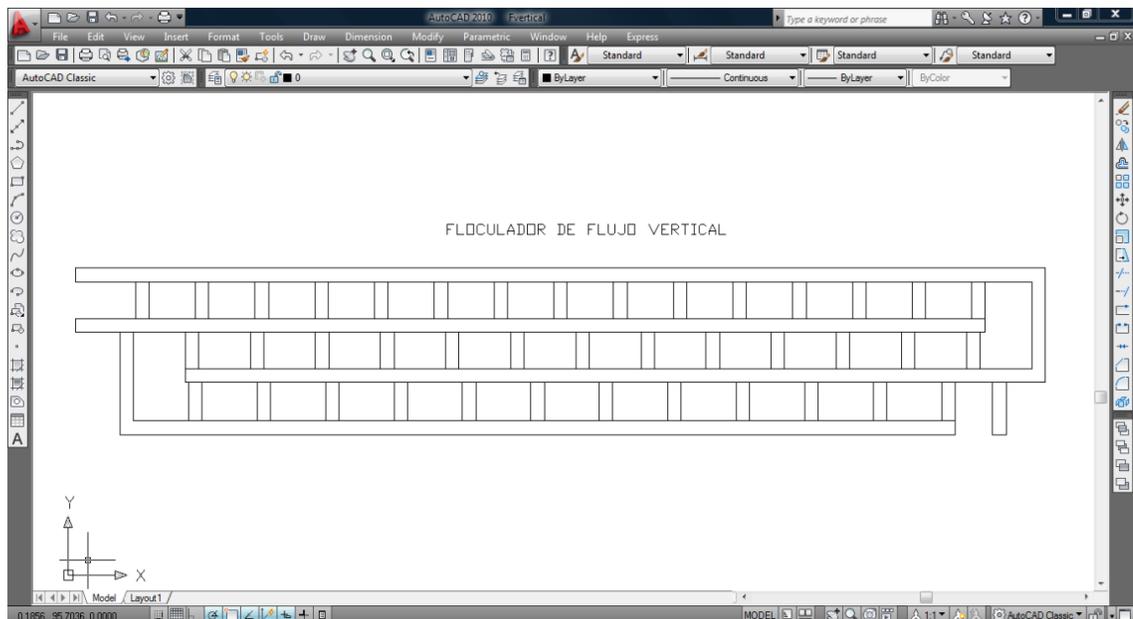
El número de cámaras escogidas, como ejemplo para este caso, para el mezclador lento de flujo vertical fue de tres, al igual que en el mezclador de flujo horizontal, solo que se cambió el caudal a 74.4 litros por segundo, ya que en este tipo mezcladores se recomienda tratar caudales superiores a 50 L/s.

Las separaciones entre tabique y demás parámetros, calculados para este sistema hidráulico, se los puede apreciar en la memoria de cálculo de la figura 25.



**Figura 25.** Memoria de cálculo para el mezclador lento de flujo vertical

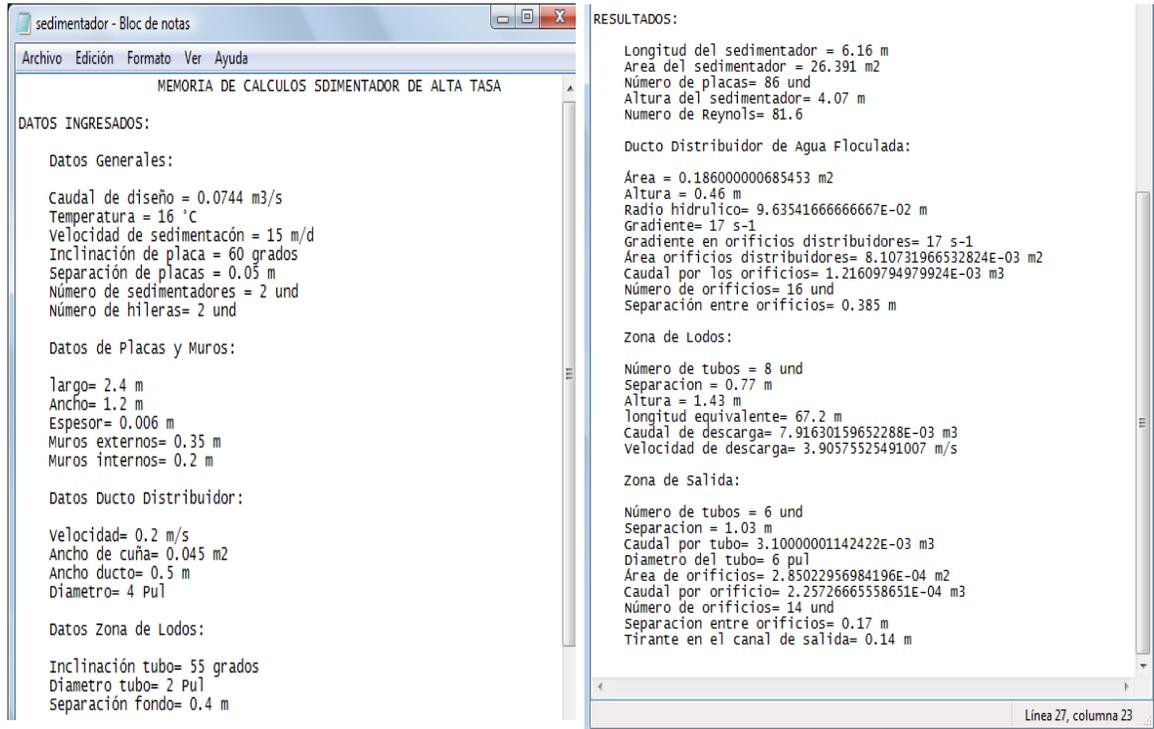
La figura 26 corresponde al dibujo generado por el software, para los datos del mezclador de flujo vertical, en el cual se aprecia la configuración de las cámaras elegidas.



**Figura 26.** Plano en planta para el mezclador lento de flujo vertical

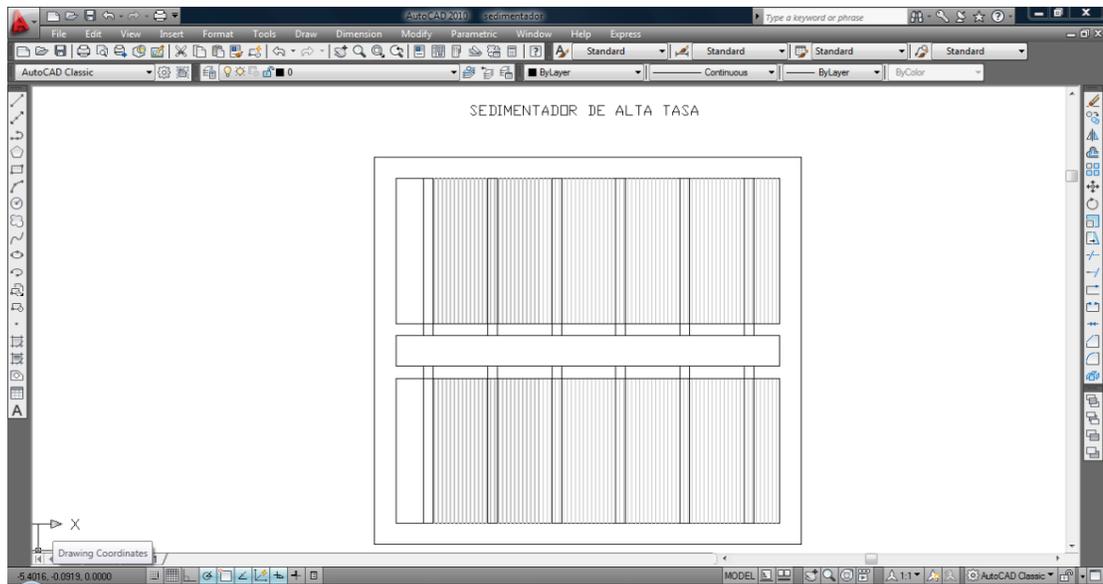
## 7.5. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL SEDIMENTADOR DE ALTA TASA

Los parámetros o datos ingresados para el cálculo del sedimentador de alta tasa, se los puede apreciar en la memoria de cálculo de la figura 27. Para este caso en particular se eligió un número de dos unidades de sedimentación, cada una con 2 hileras de placas.



**Figura 27.** Memoria de cálculo para el sedimentador de alta tasa

El dibujo del sedimentador representado en la figura 28, muestra únicamente una unidad tipo, es decir que el software solo dibuja un sedimentador, el resto de unidades (en este caso 2) es exactamente igual a la unidad tipo. En esta figura se puede apreciar, en el centro de esta, el canal de agua decantada y los tubos perforados que llegan a este, además se puede apreciar la configuración de las hileras de placas.



**Figura 28.** Plano en planta para el sedimentador de alta tasa

## 7.6. PRUEBAS Y RESULTADOS PARA EL FILTRO AUTOLAVANTE

Por último están los resultados para el filtro autolavante representados, en la memoria de cálculo de la figura 29 y en el plano en planta de la figura 30.

El plano en planta del filtro está compuesto, por un canal de entrada y uno de salida. En la parte central están ubicadas las canaletas de lavado, para este caso se indica el ejemplo de 2 canaletas empotradas a los lados, pero también el software ofrece la opción de elegir entre una o dos canaletas no empotradas.

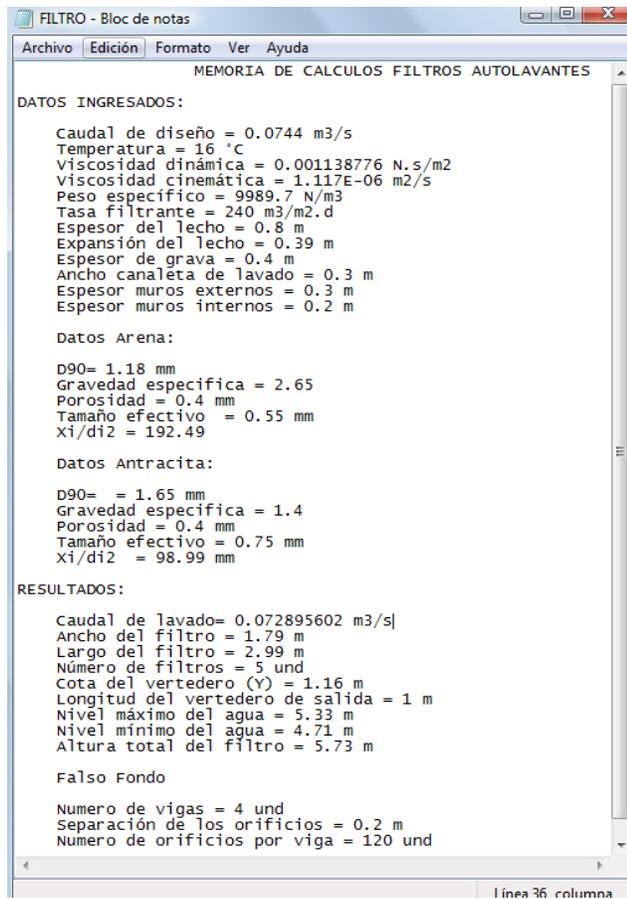


Figura 29. Memoria de cálculo para el filtro autolavante

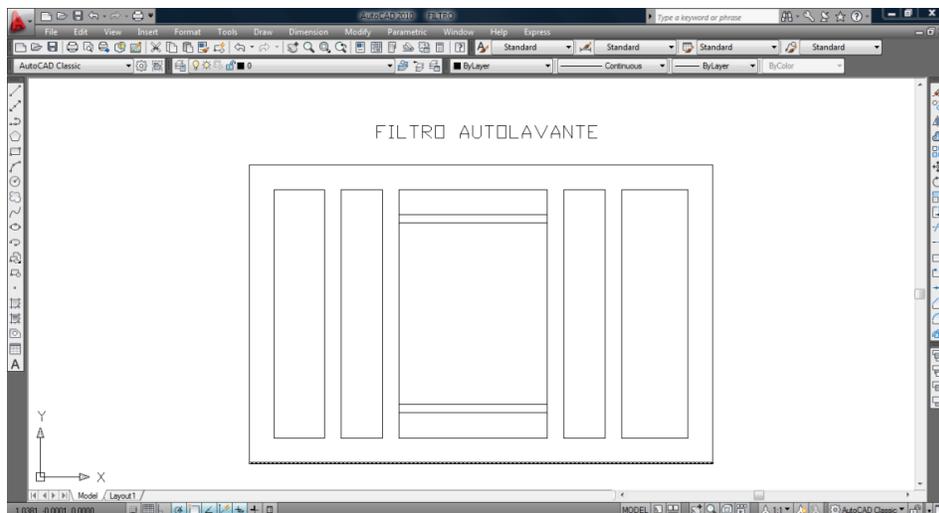


Figura 30. Plano en planta para el filtro autolavante

## 8. CONCLUSIONES

Después de haber realizado un meticuloso y laborioso estudio de las diferentes partes que conforman la planta de tratamiento de agua, así como el diseño y programación de las diferentes partes hacen parte del software y luego de haber realizado una serie de pruebas se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Ya que la vista en planta, del sistema total en conjunto depende en gran parte de la topografía del lugar, se hace una presentación individual de cada uno de los sistemas hidráulicos para que el diseñador a cargo cree las interconexiones de acuerdo con las condiciones en las cuales será proyectada la planta de tratamiento.
- El formato .dxf, utilizado en la elaboración de planos demostró tener mejor compatibilidad que el formato .scr, inicialmente planteado, ya que este último solo es compatible para algunas versiones de Auto CAD, mientras que el formato .dxf no tiene ningún problema de compatibilidad con este programa de diseño.
- Gracias a una codificación eficiente, el tiempo en el que se obtiene los resultados (planos en planta y memorias de cálculos) es instantáneo, evitándole así molestias al usuario.
- Las ayudas generadas por parte del *software*, dan una mejor comprensión acerca de los valores que se deben de ingresar en las cajas de texto del mismo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Pérez Jorge, "Manual de potabilización del agua" [tesis de posgrado]. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas; 1997. P.3-6
- [2] Arango Álvaro, "La Biofiltración, una alternativa para la potabilización del agua", "Revista Lasallista de Investigación" Vol. 1, No 002, 2004
- [3] Colombia. Ministerio de la Protección Social. Resolución 2115 De Junio 22 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. Bogotá, D. C: Ministerio de la Protección Social; 2007.
- [4] Lenntech. "FAQ de la microbiología del agua Preguntas frecuentes". [Artículo de internet]. Disponible en: <http://www.lenntech.es/faq-microbiologia-del-agua.htm>
- [5] National Academy of Sciences "El Agua Potable Segura es Esencial". [Texto en internet]. Disponible en: <http://drinking-water.org/html/es/Treatment/Treatment-Processes.html>
- [6] Cánepa de Vargas, Lidia "Capitulo 5 Mezcla Rápida" [artículo de internet]. Disponible en PDF. <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsatr/fulltext/tratamiento/manuall/tomol/cinco.pdf>
- [7] Córdova Jorge "Rediseño de la planta de tratamiento de agua potable Santa Rosa de la parroquia de Santa Rosa en la ciudad de Ambato" [tesis de grado]. Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de ciencias; 2009. Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/243/1/96T00110.pdf>
- [8] Richter Carlos. Sub módulo C.19.3.1. Mezcla rápida. Módulo C.19.3. Diseño. Programa Regional de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano.
- [9] Romero Rojas Jairo. "Calidad del agua". Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 1ª Edición, Bogotá, Colombia, 2002
- [10] Di Bernardo Luis, (1993); Metodos e técnicas de tratamiento de Agua, EBES-Asociación Brasileira de Engenharia Sanitaria e Ambiental. Rio de Janeiro Brasil.
- [11] César Valdez Enrique, Vázquez Alba. "Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales". Fundación ICA. [Artículo de internet]. Disponible en: [http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca\\_virtual/doc003/CAPITULO9.pdf](http://www.capac.org/web/Portals/0/biblioteca_virtual/doc003/CAPITULO9.pdf)

[12] Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental. "Plantas De Filtración Rápida". [Artículo de internet]. Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/eswww/fulltext/tratagua/rapida/rapida1.html>

[13] Ras 2000. Título C.

[14] Arboleda Valencia Jorge, (2000); Teoría y práctica de la purificación del Agua, Acodal, Santa Fe de Bogotá

[15] Trujillo Martínez David, Cisneros Blanca Jiménez. "Comportamiento hidráulico de un sedimentador de alta tasa con módulo de tubos" [Artículo de internet]. Disponible en: [http://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&product\\_id=71&category\\_id=21&option=com\\_virtuemart&Itemid=88&lang=es](http://www.imta.gob.mx/tyca/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&product_id=71&category_id=21&option=com_virtuemart&Itemid=88&lang=es)

[16] Sedimentadores de alta tasa. [Texto en internet]. Disponible en: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Sedimentadores-De-Alta-Tasa/573838.html>

[17] Granados Natalia. "determinación de la dosis más efectiva de la mezcla de carbón activado con sulfato de aluminio líquido para la potabilización del agua en la empresa Aguas y Aguas de Pereira". [Tesis de grado]. Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de tecnologías. Pereira. 2007

[18] Filtración. [Texto en internet]. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/48664387/filtros>

[19] Vázquez María." ¿QUE SON LOS DIAGRAMAS DE FLUJO?". [Texto en internet]. Disponible en: [http://www.elprisma.com/apuntes/administracion\\_de\\_empresas/quesonlosdiagramasdeflujo/](http://www.elprisma.com/apuntes/administracion_de_empresas/quesonlosdiagramasdeflujo/)

[20] Norma Sismo Resistente 2010 (NSR-10).