

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Estudio de los parámetros de diseño en el pretratamiento
de pequeñas Plantas Depuradoras de Residuales**

Autor: Leticia Alvarez Medina

Tutor: Vitaliy Danilo Suárez Chernov

Santa Clara

Junio 2016

Año 58 de la Revolución

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Construcciones

Departamento de Ingeniería Hidráulica



TRABAJO DE DIPLOMA

**Establecimiento de los parámetros de diseño en el
pretratamiento de pequeñas Plantas Depuradoras de
Residuales**

Autor: Leticia Alvarez Medina

Tutor: Vitaliy Danilo Suárez Chernov

Santa Clara

Junio 2016

Año 58 de la Revolución



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Automática, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

La diferencia entre ganar y perder es a menudo no rendirse.-

Walt Disney

DEDICATORIA

A PANCHIN

AGRADECIMIENTOS

Durante mi formación como ingeniero han estado presentes personas a las que no quiero dejar de agradecer por todo el apoyo y la atención en los momentos más difíciles de la carrera.

Es por ello que doy gracias a:

Mi tutor Vitaly por atenderme con la mayor disposición, dedicarme todo el tiempo posible y darme la confianza de que todo va a salir bien.

A todos los buenos profesores de los que tanto aprendí.

A mis padres y hermanos por confiar en mí, apoyarme en todas mis decisiones, guiarme por un buen camino y hacer posible que hoy sea una profesional.

A mi novio Nelson por tener la paciencia de soportarme todo el tiempo y estar siempre a mi lado en los buenos y malos momentos.

A todos mis compañeros del aula y mis amigos por regalarme siempre una sonrisa.

A todas aquellas personas que de una forma u otra contribuyeron con mi formación.

RESUMEN

El presente trabajo se realiza con la finalidad de Desarrollar la modelación numérica computacional del diseño propuesto de una etapa de pretratamiento correspondiente a una pequeña planta de depuradora de residuales. Inicialmente se comienza por una revisión bibliográfica incluyendo fundamentalmente criterios de diseño en el pretratamiento. Dichos elementos constituyen las bases de un procedimiento de diseño que se apoya en los parámetros establecidos por las normas cubanas los que son modelados para las condiciones de un dimensionamiento previo a la propuesta de diseño. A partir de las técnicas computacionales se elabora una secuencia lógica de cálculo que responde a la solución numérica de la ecuación diferencial que gobierna las condiciones de fronteras. Los resultados obtenidos constituyen una relación geométrica a lo largo del pretratamiento considerando las condiciones relacionadas con el diseño.

This work is done in order to develop computational numerical modeling of the proposed design of a stage corresponding to a small sewage plant wastewater pretreatment. Initially it begins with a literature review mainly including design criteria in the pretreatment . These elements form the basis of a design process that relies on parameters set by Cuban standards which are modeled for the conditions of a pre- design proposal sizing . From computational techniques for calculating a logical sequence corresponding to the numerical solution of the differential equation governing the boundary conditions it is made . The results constitute a geometric relationship over pretreatment considering the conditions related to the design .

TABLA DE CONTENIDOS

PENSAMIENTO	i
AGRADECIMIENTOS	iii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS	4
1.1 Aguas residuales urbanas	4
1.1.1 Conceptos generales en el tratamiento de agua	5
1.1.2 Características fisicoquímicas de las aguas residuales domesticas	7
1.2 Determinación del caudal de diseño	8
1.3 Niveles de tratamiento.....	12
1.3.1 Cribado.....	14
1.3.2 Desarenador	15
1.3.3 Medidores de caudal	17
1.4 Modelado numérico de la lámina libre.....	17
1.4.1 Principios de flujos multifásicos.....	19
1.4.2 Simulación dinámica de fluidos computacional (CFD).....	20
CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y CONSIDERACIONES DE LA MODELACIÓN	22
2.1 Diseño del sistema de rejillas.....	22
2.1.1 Dimensionamiento de Rejillas y el canal de Aproximación.....	24
2.2 Diseño del desarenador	27
2.3 Flujo controlado por un vertedero sutro.....	30
2.4 Solución del modelo matemático.....	32
2.4.1 Generación de la geometria	35

2.4.2	Generación del mallado	37
CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS		40
3.1	Análisis de la convergencia.....	40
3.2	Desarrollo de la lámina de agua.	42
3.3	Pérdida de carga en el sistema de rejillas.....	43
3.4	Comportamiento hidrodinámico en la canaleta de distribución.....	45
3.5	Condiciones de hidrodinámicas del desarenador	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		51
	Recomendaciones	51
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		52

INTRODUCCIÓN

Las aguas contaminadas provienen de diferentes fuentes, como pueden ser las industrias y las zonas habitacionales, por lo que están compuestas de partículas muy variadas, tanto en tamaño como en composición, refiriéndose solo al agua proveniente de una casa, esta trae consigo desperdicios alimenticios, grasas, desechos del inodoro, jabones utilizados en baños y para lavar ropa, y un sin número de materia orgánica e inorgánica que es desalojada, por esto es necesario hacer una división de los procesos de limpieza, simplificándolos y estableciendo los objetivos que se persiguen con cada sistema utilizado, para poder medir su eficacia.

Existe una obligación moral por parte de las sociedades humanas de descontaminar el medio ambiente que se le ha encomendado manejar y que representa la herencia que garantice la supervivencia de la especie en el planeta tierra. Paralelamente, en la actualidad se viene presentando un creciente reconocimiento de esta imperiosa necesidad por parte de todas las sociedades en el mundo, el cual ha permitido una mayor dedicación de esfuerzos por parte de las entidades competentes en pos de lograr una armonía entre el desarrollo y un medio ambiente saludable.

Esta situación ha llevado a tomar conciencia de la importancia de tratar las aguas residuales. Por lo que es necesario desarrollar sistemas de tratamiento sostenibles acordes a las condiciones socioeconómicas y culturales de los pueblos, buscando el mejoramiento de las condiciones de salud de las personas y de una verdadera interacción con el medio ambiente que permita su cuidado y conservación en el tiempo.

Un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas, tiene como objetivo principal el de reducir o corregir algunas características indeseables, de tal manera que su uso y su disposición final cumpla las normas y criterios definidos por la autoridades sanitarias. Los

tratamientos para las aguas de desecho, pueden reconocerse en base a su ubicación en el proceso de limpieza, como primarios, secundarios y avanzados. Los últimos tienen fines muy específicos, que para este trabajo sería innecesario estudiarlos, pero en su lugar es muy conveniente analizar algunos sistemas alternativos que pueden formar parte crucial en el diseño del proyecto final.

Las impurezas presentes en las aguas residuales pueden removerse con procesos químicos, físicos y/o biológicos. Los métodos individuales suelen clasificarse en operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios.

El sistema de pretratamiento es una estructura auxiliar, debe preceder a cualquier sistema de tratamiento. Esta estructura persigue principalmente los siguientes objetivos: reducir los sólidos en suspensión de distintos tamaños que trae consigo algún influente de aguas residuales crudas, evitar la obstrucción de los conductos, proteger los equipos, evitar sobrecargas hidráulicas en los reactores causadas por las aguas pluviales, entre otros.

La primera operación unitaria obligada en el tratamiento de aguas residuales es el cribado, esta operación se realiza usando rejillas y circulando el agua a través de ellas. Sus principales objetivos son: reducir los sólidos en suspensión de distintos tamaños que trae consigo el influente de aguas residuales crudas, evitar la obstrucción de los conductos, proteger los equipos y reducir al mínimo la absorción de oxígeno(Dorado, 1993).

La distancia o la abertura de las barras de las rejillas dependen del tamaño de las partículas que se desean retener y eliminar mediante esta operación y de su limpieza, la cual puede hacerse de forma manual o mecánica.

La dinámica de fluidos es la ciencia que estudia el movimiento de un fluido. Ésta siempre ha utilizado dos vías de acción: la teoría y los experimentos, y no ha sido hasta el transcurso del siglo XX que empezó a desarrollarse una tercera vía: por métodos numéricos: CFD (Computational Fluid Dynamics).

El desarrollo de estas simulaciones numéricas ha representado un gran avance para el mundo de la ingeniería, usando los resultados extraídos de CFD para mejorar todo tipo de diseños conceptuales, mejora en el detalle del producto, así como un rápido acceso en la resolución de problemas o la necesidad de rediseño. (Erdbrink, Krzhizhanovskaya, & Slood, n.d.)

Los análisis por CFD actualmente son un complemento indispensable en cualquier prueba o experimento de cualquier tipo, ya sea de canal de ensayo, reacción química, instrumentación, impactos, etc. Su gran contribución es la reducción del esfuerzo total requerido en el laboratorio.

Problema científico: Los parámetros típicos correspondientes a los criterios de diseño empleados en la etapa del pretratamiento para pequeñas plantas depuradoras de residuales no se ajustan para una adecuada operación provocando el sobredimensionamiento de sus componentes y la afectación de las etapas posteriores de la instalación.

Hipótesis: Si se dimensionan los elementos que componen la etapa del pretratamiento sobre la base teórica de la hidráulica de canales y se reproduce el comportamiento hidrodinámico a través de una modelación numérica computacional, entonces es posible estimar nuevos parámetros típicos para su diseño en pequeñas plantas depuradoras de residuales.

Objetivo general: Desarrollar la modelación numérica computacional del diseño propuesto de una etapa de pretratamiento correspondiente a una pequeña planta de depuradora de residuales para establecer los parámetros típicos requeridos a partir estudio del comportamiento hidrodinámico en el sistema.

Objetivos específicos:

- Definir los conceptos y definiciones de las aguas residuales urbanas y sus noveles de tratamiento así como la fundamentación teórica de la modelación hidrodinámica de la lámina libre.
- Desarrollar el procedimiento de cálculo de los componentes del pretratamiento y las consideraciones previas del modelo numérico computacional.
- Establecer parámetros típicos de diseño a partir de la modelación hidrodinámica y realizar una valoración técnica-económica de los resultados.

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LAS AGUAS RESIDUALES URBANAS

La prevención de la polución del agua y del suelo, es solamente posible si se definen técnicas apropiadas de tratamiento y disposición de las aguas residuales. De acuerdo con diferentes estudios y caracterizaciones, se ha afirmado que la cantidad de excrementos humanos húmedos es aproximadamente de 80 a 270 gramos por persona por día, que un 20% de la materia fecal húmeda y un 5% de la orina húmeda es material orgánico putrescible. Por tanto, el agua residual doméstica cruda es putrescible, olorosa y un riesgo para la salud.

Cuando se vierten las aguas crudas a un cuerpo receptor, en exceso de la capacidad de asimilación de contaminantes, este se ve disminuido en su calidad y aptitud para usos benéficos de las personas. El objetivo del tratamiento de aguas, es el reducir la carga de contaminantes para proteger la salud y promover el bienestar de los seres humanos.

1.1 Aguas residuales urbanas

Los contaminantes en las aguas residuales son usualmente, una mezcla compleja de componentes orgánicos e inorgánicos y normalmente no es ni práctico, ni posible obtener un análisis completo de la mayoría de las aguas residuales.

Las aguas residuales industriales, son todas aquellas que se descargan de las instalaciones de plantas manufactureras, después de haber sido usadas en diversos procesos de transformación o de soporte, mientras que las aguas residuales domésticas, se definen como aquellas que se descargan de establecimientos comerciales, instituciones y áreas residenciales que se reciben en el sistema de alcantarillado, para su tratamiento en instalaciones específicas y se denominan también, aguas residuales urbanas o municipales.

Las aguas residuales urbanas “crudas” o no tratadas, tienen muchos componentes indeseables, algunos de los cuales, como se anotó, reducen el contenido de oxígeno, cuando se descargan en otros cuerpos de agua, mientras que algunas más, favorecen el crecimiento de ciertos microorganismos, como las algas. (De Azevedo, 1976)

Estos compuestos indeseables, están formados tanto por materia orgánica, como inorgánica, así como por material soluble e insoluble. Es por tanto, muy importante, realizar la caracterización de las aguas residuales, antes de que se haga la selección y diseño del proceso para tratarlas (Hernández, 2000).

En general, el líquido cloacal contiene un 99,99% de agua. La materia sólida está constituida por los desechos sólidos que normalmente provienen de las edificaciones que sirven el sistema cloacal: fibras de papel (celulosa), jabón, aceites y grasas, residuos de alimentos de variada procedencia y composición, heces, orina, material mineral insoluble (arena, arcilla y grava), ente otros.

Caracterización general de los componentes del agua residual

A continuación se presenta un esquema ilustrativo de la caracterización del agua residual.

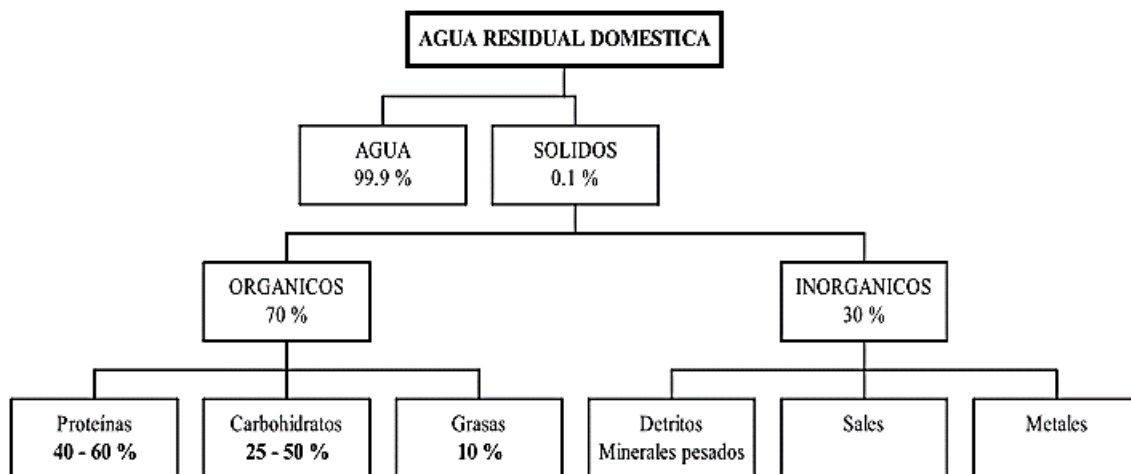


Figura 1.1. Esquema de los componentes del agua residual (Eddy, n.d.)

1.1.1 Conceptos generales en el tratamiento de agua

- **Demanda Química de Oxígeno (DQO)**

Representa una medida de la cantidad de materia carbonosa contenida en los diferentes tipos de materia orgánica presentes en las aguas residuales. Está basada en el hecho de que todos los compuestos orgánicos (con raras excepciones) pueden ser oxidados a dióxido de carbono y agua, en medio ácido, con agentes fuertemente oxidantes.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)**

Hace referencia a la cantidad de oxígeno requerido para la respiración de los microorganismos responsables de la estabilización (oxidación) de la materia orgánica a través de su actividad metabólica en medio aerobio. Así mismo, representa indirectamente una medida de la concentración de materia orgánica biodegradable contenida en el efluente.

- **Sólidos Totales**

En el agua residual se identifican componentes sólidos que le atribuyen propiedades indeseables al agua. Los sólidos totales son los residuos presentes luego de la evaporación de la materia, se clasifican de la forma siguiente:

- **Temperatura de evaporación.**

a) Sólidos Totales: Residuo remanente después de la evaporación y secado de la muestra (sin sedimentar, filtrar o centrifugar) a 103°C durante 60 minutos, determina los sólidos totales.

b) Sólidos Fijos: Residuo remanente después de la evaporación, carbonización e incineración durante una hora y a 600°C, esto da la idea del contenido mineral.

c) Sólidos Volátiles: Son el resultado de la diferencia entre los sólidos totales y los sólidos fijos. Éstos representan la materia orgánica biodegradable tanto en partículas como disuelta presente en el agua residual.

- **Tamaño de partícula.**

a) Sólidos Suspendidos no coloidales: Las partículas tienen un tamaño mayor a una micra de diámetro. Pueden ser removidos mediante la aplicación de tratamientos físicos sencillos.

b) Sólidos Coloidales: Las partículas tienen un diámetro de 1 a 1×10^{-3} micras. Con la aplicación de sustancias coagulantes que neutralicen las cargas o potenciales

electrocinéticas de sus micelas coloidales, se les puede aglutinar sus núcleos incipientes, que al flocular pueden crecer al límite de ser removidos a su vez por la acción de la gravedad.

c) Sólidos Disueltos: Conformados por dispersión homogénea, molecular o iónica de diámetros entre 1×10^{-3} y 2×10^{-4} micras. Los sólidos disueltos volátiles pueden ser removidos o transformados mediante la acción biológica de microorganismos que los utilizan como sustratos solubles en su mecanismo metabólico.

1.1.2 Características fisicoquímicas de las aguas residuales domesticas

La característica física más importante del agua residual es el contenido total de sólidos, término que engloba la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta. Otras características físicas importantes son el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. Cerca del 75% de los sólidos en suspensión y del 40 % de los sólidos filtrables de un agua residual de concentración media son de naturaleza orgánica. Son sólidos de origen animal y vegetal, así como de las actividades humanas relacionadas con la síntesis de compuestos orgánicos(Hernández, 2000).

Los materiales retenidos en las rejillas se conocen con el nombre de residuos o basuras. Cuanto menos es la abertura libre del tamiz, mayor será la cantidad de residuos eliminada. A pesar de que no existe ninguna definición que permita identificar los materiales separables mediante rejillas, y de que no existe ningún método reconocido para la medición de la cantidad de residuos eliminada, éstos presentan ciertas propiedades comunes. Los residuos de tamaño grande que son retenidos en rejillas con separaciones de 15 mm o superiores, consisten en desechos tales como piedras, ramas, trozos de chatarra, papel, raíces de árboles, plásticos y trapos. También se puede separar materia orgánica. El contenido de trapos puede ser importante, y se ha estimado visualmente que representa entre el 60 y 70 % del volumen total de residuos en rejillas de 25 a 100 mm de separación entre barras respectivamente. Los residuos de tamaño grueso tienen un contenido en materia volátil muy alto (del 80 al 90 % o más), con un contenido de materia seca del 15 al 25 % y una densidad entre 640 y 960 kg/m³.

A continuación, se presenta una tabla de composición de aguas residuales para dar a conocer mejor la proporción de sólidos orgánicos y minerales que contribuyen a la inestabilidad de los líquidos cloacales.

Tabla 1.1. Contribución de las fracciones del líquido cloacal a las concentraciones del mismo.

Parámetros de concentración	Separación Física		Separación química corregida para coagulantes agregados	
	Partícula (%)	Solubles (%)	Partícula (%)	Solubles (%)
Sólidos totales	34.7	65.3	41.1	58.9
Sólidos Volátiles	57.6	42.4	63.0	37.0
DQO	77.3	22.7	83.6	16.4
Nitrógeno Orgánico	80.5	19.5	77.0	23.0

1.2 Determinación del caudal de diseño

El Sistema de Alcantarillado de Aguas Residuales está constituido por el conjunto de estructuras e instalaciones destinadas a recoger, evacuar, acondicionar y descargar las aguas usadas provenientes de un sistema de suministro de agua; así que los aportes de aguas que circulan por esas tuberías están casi en su totalidad constituidos por los consumos de aguas para fines domésticos, comerciales e industriales, etc. Sin embargo, se puede observar que no toda el agua abastecida por el acueducto vuelve, en forma de agua usada a la cloaca, debido a que una parte es descargada fuera del sistema de recolección. (LUX MONROY, 2010)

Gasto de diseño (Qd)

Si el área a servir tuviera más de uno de los usos antes señalados, los caudales de aguas residuales se deberán estimar como la suma de las contribuciones parciales por uso, debiéndose efectuar el diseño de los tramos de alcantarillado en base del aporte calculado para cada uso, y no usando el valor promedio por área unitaria. El gasto de diseño hidráulico del sistema de alcantarillas se deberá calcular de la forma siguiente:

$$Q_d = Q_{max} + Q_{inf} + Q_{com} + Q_{ind} + Q_{int} \quad (1.1)$$

$$Q_{com} = \text{Gasto comercial} \quad (1.2)$$

$$Q_{ind} = \text{Gasto industrial.} \quad (1.3)$$

$$Q_{int} = \text{Gasto institucional o público.} \quad (1.4)$$

Comerciales (Q_{Com})

Para zonas netamente comerciales, el caudal de aguas residuales Q_{Com} debe estar justificado con un estudio detallado, basado en consumos diarios por persona, densidades de población en estas áreas y coeficientes de retorno mayores que los de consumo doméstico. Para zonas mixtas comerciales y residenciales pueden ponderarse los caudales medios con base en la concentración comercial relativa a la residencial. Q_{Com} debe ser estimado para las condiciones iniciales, Q_{Com, i}, y finales, Q_{Com, f}, de operación del sistema, de acuerdo con los planes de desarrollo comercial previstos.

Industriales (Q_{Ind})

Los aportes de aguas residuales industriales Q_{Ind} deben ser determinados para cada caso en particular, con base en información de censos, encuestas y consumos industriales y estimativos de ampliaciones y consumos futuros. Para cualquier Nivel de Complejidad del Sistema, es necesario elaborar análisis específicos de aportes industriales de aguas residuales, en particular para zonas netamente industriales e industrias medianas y grandes, ubicadas en zonas residenciales y comerciales.

En cada caso, debe considerarse la naturaleza de los residuos industriales, y su aceptación al sistema de alcantarillado estará condicionada por la legislación vigente con respecto a vertimientos industriales. Q_{Ind} debe ser estimado para las condiciones iniciales, $Q_{Ind, i}$, y finales, $Q_{Ind, f}$, de operación del sistema, de acuerdo con los planes de desarrollo industrial previstos.

Para el cálculo del caudal medio diario Q_{Med} no fueron estimados los aportes de aguas residuales industriales Q_{Ind} , debido a que en las pequeñas comunidades urbanas no existen actividades industriales considerables.

Institucionales (Q_{INT})

Los aportes de aguas residuales institucionales Q_{INT} , entre los cuales tenemos: escuelas, colegios y universidades, hospitales, hoteles, cárceles, etc. Deben determinarse para cada caso en particular, con base en información de consumos registrados en la localidad de entidades similares. Sin embargo, para pequeñas instituciones ubicadas en zonas residenciales, los aportes de aguas residuales pueden estimarse a partir de valores por unidad de área institucional.

Q_{INT} debe ser estimado para las condiciones iniciales, $Q_{INT, i}$, y finales, $Q_{INT, f}$, de operación del sistema, de acuerdo con los planes de desarrollo previstos. Teniendo en cuenta que en las pequeñas comunidades urbanas, los aportes por uso residencial representan más del 95% del consumo total, para el cálculo del caudal medio diario Q_{MED} no fueron estimados los aportes de aguas residuales comerciales Q_{Com} e institucionales Q_{INT} . Además, en el casco urbano del municipio, las actividades comerciales son manejadas a nivel familiar, constituyéndose en aportes domésticos. En el caso de los aportes institucionales, estos fueron considerados al adoptar como dotación neta el valor estimado del consumo medio diario por habitante (100 L/hab-día).

Gasto máximo de aguas residuales (Q_{max})

El gasto máximo de aguas residuales domésticas se deberá determinar utilizando el factor de relación de Harmon.

$$Q_{max} = \left[1 + \frac{14}{4 + P^{1/2}} \right] Q_m \quad (1.5)$$

Q_{max} = Gasto máximo de aguas residuales domésticas.

P = Población servida en miles de habitantes.

Q_m = Gasto medio de aguas residuales domésticas.

Gasto mínimo de aguas residuales (Q_{min})

Para la verificación del gasto mínimo en las alcantarillas se deberá aplicar la siguiente relación:

$$Q_{min} = \frac{1}{5} Q_m \quad (1.6)$$

Gasto de infiltración (Q_{inf})

Para tuberías con juntas de mortero se les deberá asignar un gasto de 10,000 L/ha/día. Para tuberías con juntas flexibles se les deberá asignar un gasto de 5000 L/ha/día. Para tuberías plásticas 2L/hora/100 m de tubería y por cada 25 mm de diámetro.

Gasto medio (Q_m)

El gasto medio de aguas residuales domésticas se deberá estimar igual al 80% de la dotación del consumo de agua.

En las tablas siguientes se muestran valores guías de dotación para diferentes usos y localidades del país. El proyectista deberá revisar las estadísticas operativas del sistema de agua potable de la localidad en estudio para determinar las dotaciones, justificando su selección.

Tabla 1.2: Dotaciones de agua

Rango de población	Dotación L/hab/día
0-5,000	100
5,000-10,000	105
10,000-15,000	110
15,000-20,000	120
20,000-30,000	130
30,000-50,000	155
50,000-100,000 y más	160

1.3 Niveles de tratamiento

Reviste mayor importancia, desde el punto de vista del saneamiento ambiental, la necesidad del tratamiento de las aguas residuales generadas por las distintas actividades de una población o ciudad, ya que a partir de las mismas, se realizará la recarga de los acuíferos. Además, el vertimiento de estas aguas residuales, dependiendo del grado de descarga, ocasiona problemas de contaminación en el suelo, las aguas subterráneas y el aire. (Yactano, n.d.)

El objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es corregir sus características indeseables, de tal manera que su uso o disposición final pueda ocurrir de acuerdo con las reglas y criterios definidos por las autoridades legislativas. Los tratamientos incluirán la reducción de la concentración de por lo menos uno de los cinco constituyentes más importantes del agua residual:

- Sólidos en suspensión.
- Material orgánico (biodegradable).
- Nutrientes (principalmente nitrógeno y fósforo).
- Organismos patógenos.
- Metales pesados.

Los diferentes tipos de tratamientos de las aguas residuales se han desarrollado en forma sencilla y general hacia dos propósitos: 1) La captación o separación de los sólidos de

acuerdo a su sedimentabilidad. 2) La estabilización biológica de los sólidos restantes. La magnitud de estos propósitos dependerá del tipo de tratamiento empleado.

Actualmente existe una gran variedad de sistemas para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, estos deberían ser seleccionados sobre la base del contexto local específico donde serán aplicados. De manera general, se puede afirmar que en los países desarrollados el número de alternativas factibles puede estar limitado debido a una regulación ambiental más estricta. De otro lado en los países en desarrollo el número de opciones puede ser más alto debido a la existencia de diversos estándares de calidad.

La naturaleza de cada componente de las aguas residuales permite dividir el tratamiento en diferentes niveles, que por lo general, van desde la remoción de componentes macroscópicos a los microscópicos. Para cada nivel se dispone de una variedad de equipos, que son diseñados y/o utilizados a medida de la capacidad y costo que permita el proyecto. Los niveles de tratamiento son descritos en las siguientes secciones.

Tratamiento Preliminar

Consiste en la remoción de constituyentes del agua de tratamiento tales como trapos, ramas, objetos flotantes, arenilla y grasa, que pudieran ocasionar problemas de mantenimiento o de operatividad en el tratamiento, en alguna de las operaciones unitarias, procesos o sistemas auxiliares.(Eddy, n.d.)

El sistema de pretratamiento está integrado por: Canal de control de velocidades, Canal de control de caudales, Cribado y desarenador. La Figura 1.2 muestra un perfil de un sistema típico de pretratamiento.

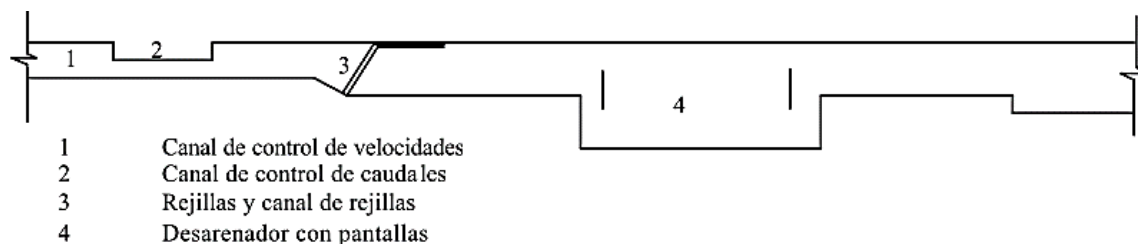


Figura 1.2. Vista en perfil de un sistema de pretratamiento (García, 1999).

1.3.1 Cribado

La primera operación unitaria obligada en el tratamiento de aguas residuales es el cribado, esta operación se realiza usando rejillas y circulando el agua a través de ellas. Sus principales objetivos son: reducir los sólidos en suspensión de distintos tamaños que trae consigo el influente de aguas residuales crudas, evitar la obstrucción de los conductos, proteger los equipos y reducir al mínimo la absorción de oxígeno (Allende, 1994).

El cribado es la operación utilizada para separar material grueso del agua, mediante el paso de ella por una criba o rejilla. De acuerdo con el método de limpieza, las rejillas o cribas son de limpieza manual o mecánica. Según el tamaño de las aberturas se clasifican como rejillas gruesas o finas. Las gruesas son aquellas con aberturas iguales o mayores de 0,64 cm (1/4 pulgada), mientras que las finas tienen abertura menor de 0,64 cm.

En el tratamiento de aguas residuales se usan rejillas gruesas, principalmente de barras o varillas de acero, para proteger bombas, válvulas, tuberías y equipos, etc., del taponamiento o interferencia causada por trapos, tarros y objetos grandes. Las características principales de los dos tipos de rejillas usados, de limpieza manual y mecánica. El número de rejillas depende del criterio del ingeniero; sin embargo, por cuestiones de mantenimiento es recomendable instalar 2 o más rejillas. Para plantas de tratamiento pequeñas, la segunda rejilla debe ser simple y de limpieza manual, ésta última se empleará en caso de emergencia y, además, se debe instalar un canal para derivar el caudal e impedir el paso del flujo a través de las rejillas cuando así se requiera. (White, 2008)

El canal en el que se encuentra la reja debe diseñarse de tal manera que la velocidad de las aguas residuales no se reduzca a menos de 0.60 m/s para evitar la sedimentación de materiales pétreos. La longitud de las rejillas de limpieza manual no debe exceder de la que permita su limpieza conveniente por el operador. En la parte superior de la rejilla debe proveerse una placa de drenaje temporal del material removido.

El canal de acceso a la rejilla debe diseñarse para prevenir la acumulación de arena u otro material pesado, antes y después de la rejilla. El canal debe, preferiblemente, ser horizontal, recto y perpendicular a la rejilla, para promover una distribución uniforme de los sólidos retenidos por ella. A medida que el material se acumula sobre la rejilla, ésta se va taponando y la pérdida de energía, consecuentemente, aumenta. El diseño estructural debe

ser el adecuado para impedir la rotura de la rejilla cuando está taponada. Los desechos removidos por las rejas son materiales que tienden a pudrirse, por lo que es necesario removerlos y desecharlos, estos desechos pueden recolectarse en tolvas, tambos o cubetas, utensilios fabricados como parte integral de la cámara de rejas. Las Figuras 1.3 muestran de manera sencilla algunos tipos comunes de sistemas de rejillas. (Dorado, 1993)

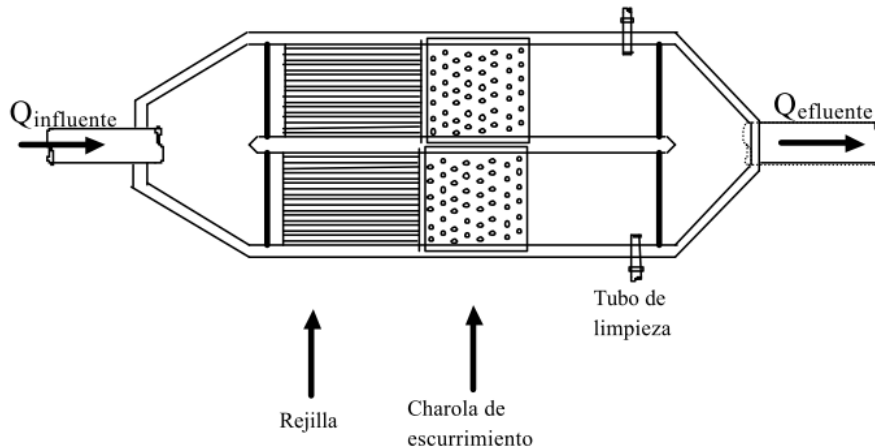


Figura 1.3. Vista en planta de un sistema manual de rejillas con dos cámaras (Allende, 2001).

1.3.2 Desarenador

Los desarenadores tienen como objetivo separar arenas, gravas, cenizas y cualquier otra materia que tenga una velocidad de sedimentación o peso específico, superior al de los sólidos orgánicos putrescibles presentes en el agua residual. La arena también incluye cascarones de huevo, pedazos de hueso, granos de café y grandes partículas orgánicas tales como residuos de comida. (VILLÓN BÉJAR, 1995)

Los canales o cámaras se construyen con el objetivo de remover materia inerte, mineral, como la arena, para prevenir desgaste en los equipos y acumulación indeseada de materia inerte pesada en sifones invertidos, tanques de sedimentación y digestores.

La mayoría de los desarenadores se construyen en forma de canales alargados y de poca profundidad, que retengan partículas con un peso específico de 2,65 y diámetro de $2 \cdot 10^{-3}$ cm, para lograr esto, a pesar de la fluctuación del flujo, se hace necesario mantener prácticamente constante la velocidad, esto se logra:

La eliminación de esos materiales ayuda a proteger los equipos mecánicos móviles contra la abrasión y contra el desgaste anormal y a reducir la formación de depósitos pesados en las tuberías, canales y conductos, así como a disminuir la frecuencia de limpieza en los digestores, la cual es necesario realizar para remover las acumulaciones excesivas de arena en tales unidades.

Existen diferentes tipos de desarenadores, los más comunes en el tratamiento de aguas residuales son los de flujo horizontal y los aireados, también conocidos como de flujo helicoidal. En el presente trabajo se desarrolla la metodología para el cálculo de uno de tipo horizontal (García, 1999).

Deberán emplearse desarenadores cuando sea necesario cumplir con lo siguiente:

- Protección de equipos mecánicos contra la abrasión.
- Reducción de la formación depósitos pesados en tuberías, conductos y canales.
- Reducción de la frecuencia de limpieza de la arena acumulada en tanques de sedimentación primaria y digestores de lodos.
- Minimizar las pérdidas de volumen en tanques de tratamiento biológico.

Existen dos tipos generales de desarenadores: de flujo horizontal y aireado.

Los desarenadores de flujo horizontal, para aguas residuales, se diseñan para una velocidad horizontal de flujo aproximadamente igual a 30 cm/s. Dicha velocidad permite el transporte de la mayor parte de partículas orgánicas del agua residual a través de la cámara y tiende a resuspender el material orgánico sedimentado, pero permite el asentamiento del material inorgánico pesado. En la práctica, para facilidad de construcción se usan desarenadores de sección trapecial, aproximada a la sección de diseño parabólica. Generalmente los desarenadores para aguas residuales se diseñan para remover todas las partículas de diámetro mayor de 0.20 mm.

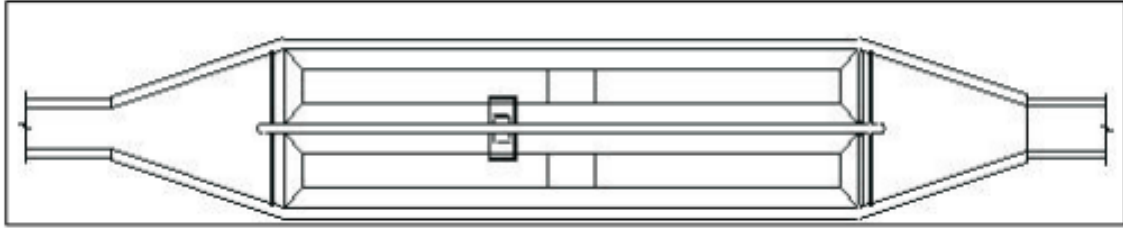


Figura 1.4. Desarenador de 2 unidades en paralelo (planta).

1.3.3 Medidores de caudal

La medición de caudales (gastos) en cualquier sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas o industriales es de gran importancia, por consiguiente, deberán poseer dispositivos para la medición de caudal, tanto en la entrada como a la salida. Son unidades de bajo costo, en relación con el costo total de la obra y suministran datos importantes para la operación de los sistemas de tratamiento. Los principales tipos de medidores usados son los vertederos proporcionales, el medidor Parshall, el medidor venturi los vertederos rectangulares y triangulares.

Medidor proporcional

Para lograr que la velocidad sea constante a través de un desarenador se emplea el vertedero proporcional, localizado a la salida del desarenador y consta de una plancha a través de la corriente. El vertedero de flujo proporcional consiste en una combinación de un vertedero con un orificio, el cual tiene una línea recta horizontal inferior que constituye la cresta del vertedero. Los lados del orificio son líneas curvas, de tal manera que el área de la sección transversal del mismo, disminuye al aumentar la profundidad de flujo sobre el vertedero.

1.4 Modelado numérico de la lámina libre

El tratamiento de la lámina libre requiere una especial atención, pues supone desde el punto de vista numérico una condición de contorno móvil. El tratamiento de esta asegura un correcto campo de presiones y velocidades en los flujos en los que la lámina libre juegue un papel importante. La lámina libre se considera una superficie de discontinuidad de las variables, lo que da ciertos problemas a la hora de evaluar los gradientes de las variables. Una característica importante de un flujo con superficie libre es la interface, y esta tendrá

efectos considerables sobre las ecuaciones de flujo multifásico, es decir, la inmiscibilidad implica realizar algunas modificaciones en las ecuaciones para dar a la solución una mejor aproximación del fenómeno.(Guan Heng Yeoh, 2010)

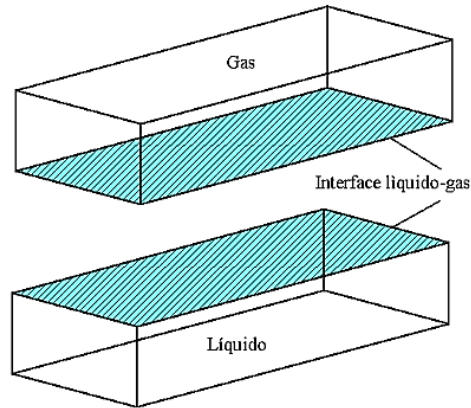


Figura 1.5 Esquema de un flujo con una interface inmiscible.(Guan 7 Heng Yeoh 2010)

Son tres los problemas que surgen del tratamiento numérico de la lámina libre: su representación discreta, su evolución en el tiempo y la forma en la que las condiciones de contorno se imponen.(Fekken 2004)

Hay varias formas de llevar a cabo este tratamiento, tanto desde un punto de vista euleriano como lagrangiano. La representación lagrangiana del fluido es conceptualmente más sencilla ya que cada zona del mallado que subdivide el fluido permanece identificada con el mismo elemento fluido durante todo el tiempo. Las fuerzas de volumen y superficie son fáciles de definir, por lo que es fácil de calcular la respuesta dinámica de los elementos. En una representación euleriana el mallado permanece fijo y la identidad de cada elemento fluido no se mantiene. Sin embargo, cada celda de la malla se puede interpretar como un elemento fluido en cuyas caras se calculan las fuerzas de superficie de una forma análoga al enfoque lagrangiano. (Fekken 2004)

Los dos métodos difieren en la manera en que los elementos fluidos se mueven de una posición a otra después de que se calculen sus velocidades. En el caso lagrangiano, la malla simplemente se mueve con las velocidades calculadas, mientras que en la euleriana es necesario calcular el flujo del fluido entre las celdas de la malla. Este flujo, o cálculo de la convección, requiere un promediado de las propiedades del flujo de todos los elementos fluidos que se encuentran en una misma celda después de un periodo de tiempo. El

promediado de la convección da lugar a un suavizado de la solución, en particular en las zonas de discontinuidad como sucede en la lámina libre. El único modo de compensar esta falta de precisión en los contornos móviles es introducir un tratamiento especial que reconozca la discontinuidad y evite el promedio a través de esta.

1.4.1 Principios de flujos multifásicos

Un flujo multifásico se caracteriza por presentar más de un tipo de fluido fluyendo de manera simultánea, ya sea que se trate cada fluido de una sustancia pura o de una mezcla homogénea. A diferencia del flujo de varios componentes, en el flujo multifásico los fluidos que lo componen no se mezclan a una escala microscópica, si no por el contrario a escala macroscópica, existiendo una interfase visible entre los fluidos. (Hidalgo, 1999)

Debido a la variedad de características que puede tener cada uno de los componentes o fases de un flujo multifásico, se puede clasificar de diversas categorías. Primero de acuerdo al número de fases que se manejan, puede ser monofásico, bifásico o trifásico; como su nombre lo indica, estos flujos presentan la presencia de una, dos o tres fases respectivamente. Luego se clasifican según el estado termodinámico de las materias que fluye, puede ser: líquido-gas, sólido-líquido y de ser trifásico, sólido-líquido-gas. Finalmente se pueden clasificar de acuerdo a como se manifiestan dichas fases; entre los casos más comunes se habla de flujo con superficie libre, cuando se está en presencia de una interfase bien diferenciada, dada por un gas y un líquido y de flujo disperso, cuando se está en presencia de una distribución discontinua como burbujas o partículas sólidas distribuidas dentro de una fase continua, como puede ser el agua o el aire. (Erdbrink et al., n.d.)

En términos generales, para el estudio de flujo multifásico, gran parte de las técnicas de modelado consideran que cada fluido que compone el flujo puede poseer su propio campo, o todos los fluidos pueden compartir un campo de flujo común, dependiendo del modelo de acople utilizado, homogéneo o no homogéneo. Estos campos, pueden interactuar recíprocamente entre uno y otro por medio de fuerzas de interface y transferencia de calor y masa, a través de la interfase existente entre las diferentes fases. Dependiendo de las propiedades de las fases presentes en un flujo, se pueden presentar diferentes situaciones para el análisis y estudio de los mismos, haciendo más o menos compleja cada situación.

Hoy en día se realizan diversos estudios, experimentales y analíticos con el fin de entender el comportamiento inherente al flujo multifásico, llevando a cabo las propuestas de los principales modelos teóricos, que van desde sistemas simples a sistemas más complejos.

1.4.2 Simulación dinámica de fluidos computacional (CFD)

El enfoque, de simulación numérica en el área de fluidos, es llamado CFD, por sus siglas en ingles de Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamic), y permite abordar situaciones complejas, de manera económica y fácil; debido a la facilidad para manipular las variables que caracterizan al flujo y el entorno que lo contiene. Para modelar fluidos empleando simuladores comerciales, por lo general se siguen una serie de pasos claramente diferenciados, en el área del CFD:

1. Se construye la geometría de la región de interés. Para ello el volumen de referencia en el que se modelará el flujo de los fluidos es construido a partir de la unión de puntos, líneas y superficies de volúmenes de control.
2. En base a la geometría creada se definen las regiones sólidas y se ajustan las propiedades de la malla. Este último, consiste principalmente en diseñar y generar la malla considerando el número y el tipo de elementos a utilizar en el diseño de la estructura, y se definen las regiones que conforman la estructura diseñada. Entre los tipos de elementos se encuentran los piramidales, prismas, cubos, tetraedros y hexaedros. Este paso es muy importante debido a que el tipo de elementos, su distribución espacial y su densidad pueden afectar significativamente tanto la convergencia de la solución como su resultado.
3. Se definen los parámetros de la simulación. Aquí se especifican las características de los fluidos y materiales con los que se va a trabajar, las variables físicas, el dominio, las condiciones de borde e iniciales, entre otras. Se seleccionan los modelos físicos que se incluyen en la simulación.
4. Luego, el problema es resuelto mediante el código numérico que corresponde a modelos previamente definidos en el paso anterior, para ello actúa de la manera:
 - Las ecuaciones diferenciales parciales se integran sobre todo el volumen control. Esto es equivalente a la aplicación de una ley básica de conservación, en dicho volumen de control.
 - Estas ecuaciones integradas se convierten en un sistema de ecuaciones algebraicas.

- Las ecuaciones algebraicas se resuelven iterativamente, hasta la convergencia de las variables.

5. Finalmente, en este paso, los resultados obtenidos se trabajan en un post-procesador para observar y extraer los comportamientos de las variables de interés. Aquí se presentan los resultados tanto en forma de curvas como ilustraciones gráficas de los campos de variables; en una variedad de presentaciones, que van desde la obtención de valores puntuales hasta complejas secuencias animadas.

CAPÍTULO 2. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO Y CONSIDERACIONES DE LA MODELACIÓN

2.1 Diseño del sistema de rejillas

Las rejillas de barras pueden ser de limpieza manual o mecánica. Según el tamaño de las aberturas se clasifican como rejillas gruesas o finas.

- Las rejillas gruesas son aquellas con aberturas iguales o mayores de 6.4 mm pueden ser de barra o varillas de acero, se deben usar para proteger bombas, válvulas, tuberías y equipos, del taponamiento o interferencia causados por trapos, tarros y otros objetos grandes.
- La longitud de la rejilla de limpieza manual no debe exceder de lo que pueda rastrillarse fácilmente a mano.
- En la parte superior de la rejilla debe proveerse una placa de drenaje o placa perforada para que los objetos rastrillados puedan almacenarse temporalmente para su escurrimiento.
- Las barras de la rejilla no deberán ser menores de 1 cm de anchura por 5 cm de profundidad.
- El canal donde se ubica la rejilla deberá ser recto, de fondo horizontal o con una pequeña pendiente hacia la rejilla y perpendicular a ésta.
- Por su gran importancia, la velocidad de aproximación deberá ser de 0.45 m/s a caudal promedio.
- Las rejillas de limpieza mecánica, deben limpiarse según su construcción, por la cara anterior o posterior. El ingeniero proyectista deberá determinar anticipadamente el tipo de equipo a usar, las dimensiones del canal de reja, el intervalo de variación de la profundidad del flujo en el canal y la separación de barras.

El Cuadro 1 y la Figura 2 muestran las normas de diseño recomendadas y los detalles para rejillas en sistemas de lagunas. La Foto 4 muestra una instalación típica. La rejilla debe tener barras rectangulares con anchos de 5 a 15 mm y espesores de 25 a 40 mm. También debe tener una plataforma de drenaje para poder drenar los sólidos gruesos retenidos que tienen una humedad de aproximadamente 80% antes de disponerlos en una manera sanitaria (Mendonça, 2000). Se recomienda una abertura entre las barras de 50 mm para que la mayoría de las heces humanas pasen por la rejilla sin ser retenidas (Véanse las Fotos 5); en esta manera el operador no tendrá que manejarlas con los altos riesgos de exposición a las enfermedades relacionadas a las excretas. El canal de aproximación antes de la rejilla debe tener un canal de desvío en el caso de una emergencia (Foto 6). La inclinación con la vertical de la rejilla varía entre 45 y 60° para que se remueva el material retenido fácilmente con un rastro. (Eddy, n.d.)

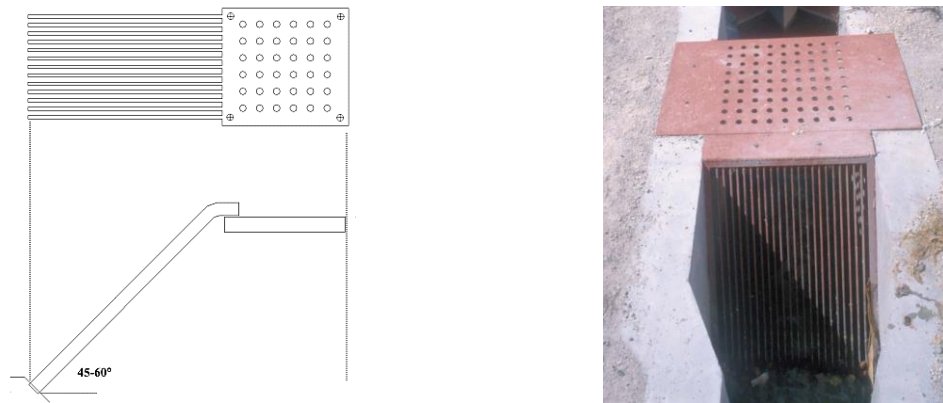


Figura 2.1: Detalle de una Rejilla de Metal con Plataforma de Drenaje.

El material de construcción de las barras y la plataforma de drenaje debe ser resistente a la corrosión; han utilizado acero inoxidable, acero galvanizado y aluminio en la construcción.

Tabla 2.1: Normas de Diseño para Rejillas Manuales

Parámetros	Norma Recomendada
Forma de barra	Rectangular No debe utilizar barras de refuerzo
Ancho de barra	5 – 15 mm
Espesor de barra	25 – 40 mm
Espaciamiento (abertura) entre barras	25 – 50 mm 50 mm recomendado para que las heces humanas pasen por las barras
Inclinación con la vertical	46 – 60°
Plataforma de drenaje	Suficiente para el almacenamiento temporal del material retenido en condiciones sanitarias
Canaleta de desvío (By-pass)	Suficiente para desviar el caudal máximo en una emergencia
Material de construcción de barras y plataforma de drenaje	Acero inoxidable o galvanizado: aluminio
Velocidad de aproximación	0.45 m/s
Tiempo de retención en canal de aproximación	≥ 3 s
Largo de canal de aproximación	≥ 1.35 m
Velocidad a través de las barras	≤ 0.6 m/s para caudal promedio ≤ 0.9 m/s para caudal máximo
Perdida de carga máxima	0.15 m
Cantidades de material retenido	0.008 – 0.038 m ³ /1000m ³
Disposición final de residuos	Solución técnica utilizando métodos sanitarios

Fuente: Adaptado de Reynolds y Richards, 1996; Mendonça, 2000; y Viceministerio de Vivienda y Construcción, 1997.

2.1.1 Dimensionamiento de Rejillas y el canal de Aproximación

Se dimensiona la rejilla y el canal de aproximación antes de la rejilla con la siguiente ecuación adaptada de Mara (1976):

$$a_{canal} = \frac{Q_{max}}{0.6P_{max}} \left[\frac{a_b + e_b}{e_b} \right] \quad (2.1)$$

Donde

a_{canal} = ancho de canal de aproximación, m

Q_{max} = caudal máximo, m³/s

0.6 = velocidad máxima a través de las barras, m/s

P_{max} = profundidad máxima de agua en el canal cuando $Q = Q_{max}$, m

a_b = ancho de barras, mm

e_b = espaciamiento (abertura) entre barras, mm

La profundidad máxima, P_{max} , es determinada durante el diseño del desarenador como se muestra adelante en un ejemplo de diseño.

Se calcula la velocidad en el canal de aproximación con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{0.6}{\frac{a_b + e_b}{e_b}} \quad (2.2)$$

Donde

v = velocidad en el canal de aproximación, m/s

La Ecuación 2.2 asume que la velocidad máxima a través de la rejilla es 0.6 m/s, y, por lo tanto, la velocidad calculada, v , debe ser cerca de 0.45 m/s si se utiliza dimensiones de a_b y e_b típicas.

Los canales de aproximación deben tener un tiempo de retención hidráulica mínimo de 3 segundos y un largo mínimo de 1.35 metros para asegurar una velocidad uniforme a través de las barras. Si el tiempo de retención hidráulica y el largo son menos, es muy probable que el canal tenga turbulencia por las barras como se ve en las Fotos 2.1.

Se calculan las pérdidas de carga a través de la rejilla con la siguiente ecuación (Metcalf & Eddy, 1991):

$$h_f = \frac{1}{0.7} \left[\frac{v_R^2 - v_a^2}{2g} \right] \quad (2.3)$$

Donde

h_f = pérdida de carga, m

v_R = velocidad a través de la rejilla, m/s

v_a = velocidad en el canal de aproximación, m/s

g = aceleración de gravedad, 9.81 m/s²

Se aplica la Ecuación 2.3 solamente cuando la rejilla está limpia (Metcalf & Eddy, 1991).

Otra forma de calcular las pérdidas de energía a través de la rejilla en función de la forma de las barras y de la altura o energía de velocidad del flujo entre las barras se desarrolla a continuación. Estas pérdidas, en una rejilla limpia se determinarán aplicando la ecuación de Kirschmer:

$$h = \beta \left(\frac{w}{b} \right)^{4/3} h_v \operatorname{sen} \theta \quad (2.4)$$

Dónde:

h = pérdida de carga, m

θ = factor de forma de las barras

w = profundidad de la barra, m

b = separación mínima entre barras, m

h_v = energía de velocidad del flujo de aproximación, m

β = ángulo de la rejilla con la horizontal.

Tabla 2.2 VALORES DE β de Kirschmer

Tipo de barras	β
Rectangular con aristas vivas	2.42
Rectangular con la cara aguas arribas semicircular	1.83
Rectangular con las caras aguas arriba y abajo semicircular	1.67
Circular	1.79

2.2 Diseño del desarenador

Criterios de diseño

- El periodo de diseño, teniendo en cuenta criterios económicos y técnicos es de 8 a 16 años.
- El número de unidades mínimas en paralelo es 2 para efectos de mantenimiento. En caso de caudales pequeños y turbiedades bajas se podrá contar con una sola unidad que debe contar con un canal de By-pass para efectos de mantenimiento.
- El periodo de operación es de 24 horas por día.
- Debe existir una transición en la unión del canal o tubería de llegada al desarenador para asegurar la uniformidad de la velocidad en la zona de entrada.
- La transición debe tener un ángulo de divergencia suave no mayor de $12^\circ 30'$.



Figura: 2.2:

- La velocidad de paso por el vertedero de salida debe ser pequeña para causar menor turbulencia y arrastre de material (Krochin, $V=1\text{m/s}$).
- La llegada del flujo de agua a la zona de transición no debe proyectarse en curva pues produce velocidades altas en los lados de la cámara.
- La relación largo/ancho debe ser entre 10 y 20.
- La sedimentación de arena fina ($d < 0.01\text{ cm}$) se efectúa en forma más eficiente en régimen laminar con valores de número de Reynolds menores de uno ($Re < 1.0$).
- La sedimentación de arena gruesa se efectúa en régimen de transición con valores de Reynolds entre 1.0 y 1 000.
- La sedimentación de grava se efectúa en régimen turbulento con valores de número de Reynolds mayores de 1 000.

Para realizar el dimensionamiento se determina la velocidad de sedimentación en relación a los diámetros de las partículas. Como primera aproximación utilizamos la ley de Stokes.

$$v_s = \frac{1}{18} g \left(\frac{\rho_s - \rho_f}{\eta} \right) d^2 \quad (2.5)$$

Siendo:

V_s : Velocidad de sedimentación (cm/seg)

D : Diámetro de la partícula (cm)

η : Viscosidad cinemática del agua (cm²/seg)

Al disminuir la temperatura aumenta la viscosidad afectando la velocidad de sedimentación de las partículas. (aguas frías retienen sedimentos por periodos más largos que cursos de agua más calientes)

Se comprueba el número de Reynolds:

$$R_e = \frac{V_s * d}{\eta} \quad (2.6)$$

En caso que el número de Reynolds no cumpla para la aplicación de la ley de Stokes ($Re < 0.5$), se realizará un reajuste al valor de V_s considerando la sedimentación de la partícula en régimen de transición, mediante el término del diámetro y el término de velocidad de sedimentación.

Se determina el coeficiente de arrastre (C_D), con el valor del número de Reynolds a partir del nuevo valor de V_s hallado.

$$C_d = \frac{24}{R} + \frac{3}{\sqrt{R}} + 0.34 \quad (2.7)$$

Se determina la velocidad de sedimentación de la partícula en la zona de transición mediante la ecuación.

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{g}{C_D} (\rho_s - 1) * d} \quad (2.8)$$

Otra alternativa para la determinación de la velocidad de sedimentación es utilizando la gráfica 2 (Anexo). Se realiza un ajuste tomando en cuenta el tiempo de retención teórico del agua respecto al práctico (coeficiente de seguridad), mediante el gráfico 3.

Así se tiene que:

$$V_s = \frac{Q}{A_s} \quad (2.9)$$

Entonces:

$$V_{s'} = \left(\frac{Q * \text{coefic. segur}}{A_s} \right) \quad (2.10)$$

Determinamos la velocidad límite que resuspende el material o velocidad de desplazamiento:

$$Vd = \sqrt{\frac{8k}{f}} g(\rho_s - 1)d \quad (2.11)$$

Siendo:

K: Factor de forma (0.04, arenas unigranulares no adheribles)

Vd: Velocidad de desplazamiento (cm/seg)

F: Factor de rugosidad de la cámara

Estimamos el valor de f mediante el gráfico 4.

$$R = \frac{4R_m * V_h}{\eta} \quad \frac{4R_m}{K} \quad (2.12)$$

Siendo:

K: 1*10⁻¹ cm

Vh: Velocidad horizontal (cm/seg)

Rm: Radio medio hidráulico (cm)

Determinamos la velocidad horizontal (Vh), mediante la ecuación.

$$V_h = \frac{Q}{A_1} \quad (2.13)$$

Luego se debe cumplir la relación $Vd > Vh$, lo que asegura que no se producirá la resuspensión. Las dimensiones de ancho, largo y profundidad serán de tal forma que se cumpla las relaciones determinadas en los criterios de diseño mencionadas anteriormente.

La longitud de la transición de ingreso la determinamos mediante la ecuación:

$$L_1 = \frac{B - b}{2 * tg\theta} \quad (2.14)$$

Siendo:

θ : Ángulo de divergencia (12° 30')

B: Ancho del sedimentador (m)

b: Ancho del canal de llegada a la transición (m)

Parámetros	Valores	
	Intervalos	Típico
Tiempo de retención, s	45 – 90	60
Velocidad horizontal, m/s	0.24 – 0.40	0.30
Velocidad de sedimentación para la eliminación de:		
Malla 65, m/min ⁽¹⁾	0.95 – 1.25	1.15
Malla 106, m/min ⁽¹⁾	0.60 – 0.90	0.75
Relación largo: ancho	2.5:1 – 5:1	
Relación ancho: profundidad	1:1 – 5:1	
Carga superficial, m ³ /m ² .d	700 – 1600	
Incremento de longitud por turbulencia en la entrada y salida	2.Hm – 0.5L	

Hm = Profundidad máxima del desarenador

L = Longitud teórica del desarenador

(1) = Si el peso específico de la arena es substancialmente menor que 2.65, deben usarse velocidades inferiores.

2.3 Flujo controlado por un vertedero sutro

Se considera la relación

$$Q = 2.74\sqrt{ab} \left(H - \frac{a}{3} \right) \quad (2.15)$$

Siendo:

a: altura mínima (m)

b: ancho de la base (m)

H: altura del agua (m)

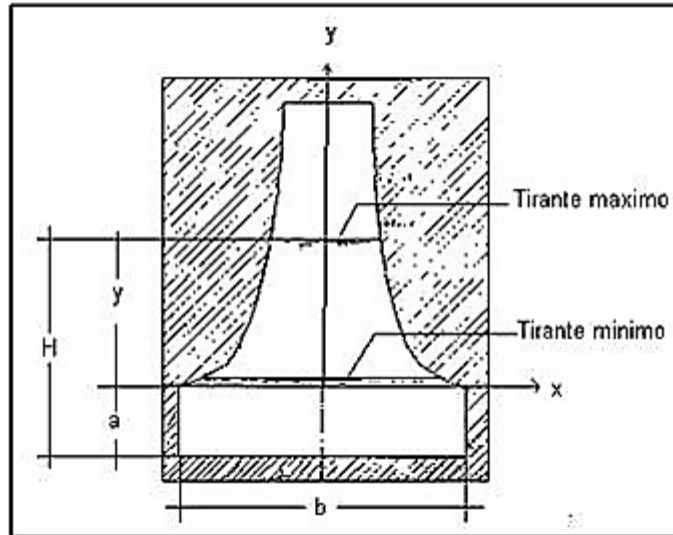


Figura 2.3: Geometría del vertedor de Sutrö(Chow, 1959)

La forma de las paredes del vertedero es dada por:

$$\frac{x}{b} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \sqrt{\frac{y}{a}} \quad (2.16)$$

Una alternativa de cálculo para este tipo de vertedero es partiendo de la ecuación:

$$Q = 1.841 h^{3/2} \quad (2.17)$$

En donde:

Q: Gasto sobre el vertedero (m³/seg.)

l: Ancho del vertedero (m)

h: Carga sobre el vertedero (m)

Agrupando la ecuación: $Q = 1.84 (l h^{1/2}) h$, tenemos que Q varia con la altura. Entonces es necesario que el valor dentro del paréntesis sea una constante K.

Luego para un Q_{max} (m³/seg), A_{tmax} (m²) y W_{max} (m) obtenemos el h_{max} (m) y l_{max} (m).

$$A_s = \frac{Q}{V_s} \quad A_t = \frac{Q}{Vh}$$

$$h' = \frac{A_t}{w} \quad l' = \frac{A_s}{w}$$

Determinamos la constante $k = l * h/2$, y hallamos los valores de l_{medio} , l_{min} , h_{medio} y h_{min} a partir de las relaciones indicadas anteriormente y de los Q_{medio} y Q_{min} .

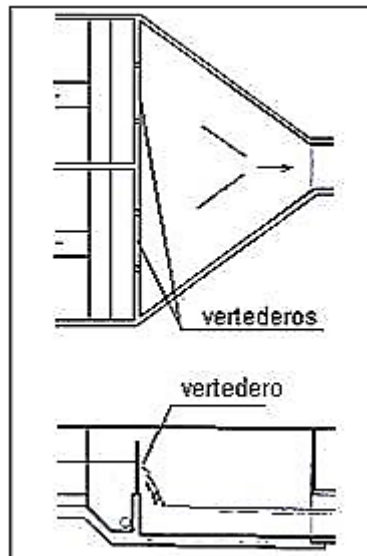
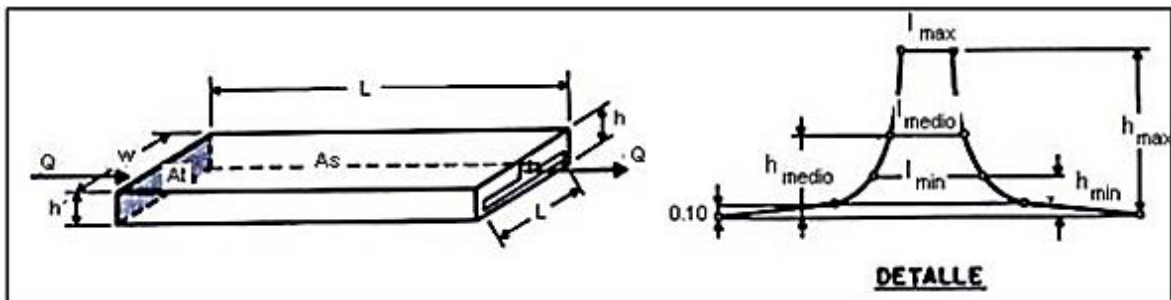


Figura 2.4: Planta y Corte de vertedero

2.4 Solución del modelo matemático.

Debido a que las ecuaciones gobernantes del problema no tienen solución analítica, este se resolvió utilizando el software FLUENT, el cual está basado en el método numérico de volumen finito, por lo cual se dará una breve descripción del mismo.

El punto de inicio del método de volumen finito es usar la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio de estudio se subdivide en un número finito de volúmenes de control (VC) contiguos y las ecuaciones de conservación se aplican a cada volumen de control. En el centro de cada VC se coloca un nodo computacional en el cual las variables son calculadas. Se interpola para expresar los valores de las variables en las superficies de los VC en términos de los valores nodales, como resultado se obtiene una ecuación algebraica para cada VC, en la cual aparecen valores de los nodos vecinos. (ANSYS, n.d.)

Para determinar los flujos totales en las caras del volumen de control, es necesario conocer los flujos convectivos y los difusivos, por lo cual se requiere un esquema de discretización para los términos convectivos; ya que, para la aproximación del gradiente difusivo, se recomienda usar el esquema de diferencias centradas. Se tienen esquemas de bajo y alto orden; los esquemas de bajo orden siempre utilizan uno o dos puntos para la aproximación en la interface del volumen de control. Los esquemas convencionales son:

- a) Diferencias centradas. Usa el promedio de los dos valores nodales más cercanos a la frontera para aproximar a la variable.
- b) Upwind. Aproxima el valor de la variable en la frontera del volumen de control con el valor nodal inmediatamente a la frontera, según el sentido de la velocidad.
- c) Híbrido. Tiene las características del esquema centrado y del esquema upwind. Usa el esquema de diferencias centradas para velocidades bajas y el upwind para velocidades elevadas.
- d) Ley de potencia. Es una modificación del esquema híbrido en base un esquema exponencial, presenta mejores resultados que el esquema híbrido.
- e) QUICK. Es un esquema de alto orden en términos del truncamiento de la serie de Taylor; la ventaja del uso de esquemas de alto orden es que éstos involucran más nodos vecinos y reducen los errores de discretización. El esquema QUICK involucra tres valores hacia adelante con una interpolación cuadrática para los valores en la interfase del volumen de control.

Para la solución de las ecuaciones se utiliza un algoritmo para acoplar las ecuaciones de momento y masa, conocido como algoritmo SIMPLEC, con el cual se realizan las

iteraciones necesarias para obtener el resultado. El algoritmo SIMPLEC se puede resumir de la siguiente manera:

1. Se establece la condición inicial de las propiedades; de cada componente de la velocidad, de la presión, la temperatura, la energía cinética turbulenta y la disipación de la energía cinética turbulenta.
2. Se obtiene la solución aproximada del campo de velocidad, resolviendo las ecuaciones de momento a partir de un campo de presión supuesto.
3. Se calcula la corrección de presión.
4. Se obtiene la corrección de las velocidades.
5. Se determinan los valores actualizados de las variables.
6. Se resuelven la ecuación de energía, la energía cinética turbulenta y la disipación de la energía cinética turbulenta y se verifica la convergencia en cada paso de tiempo, en caso de no satisfacerse el criterio de convergencia entonces se actualizan los valores para repetir todos los pasos nuevamente.
7. Alcanzada la convergencia al estado permanente (o un tiempo máximo) se determina el valor del número de Nusselt total a partir del campo de temperatura.

Como se mencionó previamente, en este trabajo se llevó a cabo la solución numérica del problema con el software Fluent. El software Fluent usa tecnología de mallado no estructurado, es decir la malla consiste de elementos como cuadriláteros y triángulos en simulaciones 2D, de hexaedros, pirámides, prismas y tetraedros en simulaciones 3D.

También, permite elegir entre varios modelos de turbulencia como lo son: el $k-\epsilon$ estándar, $k-\epsilon$ realizable y $k-\epsilon$ RNG, $k-\omega$ estándar y $k-\omega$ SST, y el modelo de esfuerzos de Reynolds (RSM) que es un modelo de turbulencia de 5 ecuaciones; así como seleccionar esquemas de solución y de métodos numéricos avanzados que garantizan resultados precisos. Fluent utiliza el método de volumen finito en el tratamiento de las ecuaciones, y se pueden elegir entre varios esquemas de discretización como: upwind de primer y segundo orden, ley de potencia, QUICK y MUSCL(ANSYS, n.d.).

Los modelos de turbulencia probados con el software Fluent fueron modelos de dos ecuaciones. De éstos, dos modelos son de la familia k-epsilon: el k- ϵ estándar y k- ϵ realizable y uno de la familia k- ω (k- ω estándar).

2.4.1 Generación de la geometría

Para la realización de la geometría se emplea el software SolidWorks como herramienta de diseño y dibujo gráfico. Las dimensiones utilizadas son resultado del procedimiento de diseño analítico antes mencionado definiéndose secciones diversas durante todo el recorrido del fluido como se observa en la figura 2.5

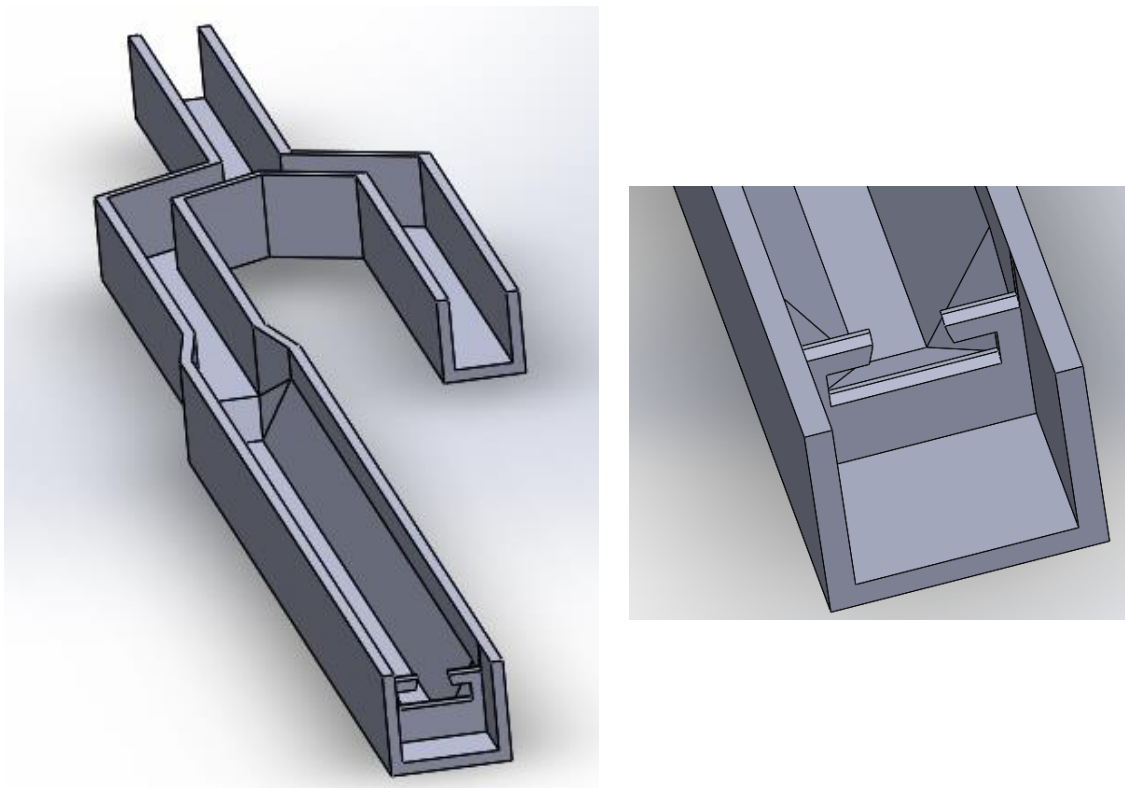


Figura 2.5: Geometría de los componentes del pretratamiento propuesto.

Las secciones que describen el proceso están calculadas a partir de los parámetros hidrodinámicos recomendados por la literatura especializada. La anterior afirmación se refiere a las velocidades de trayectoria para el Desarenador como para la canaleta de distribución. La bibliografía recomienda 0.3 m/s de velocidad de circulación en el desarenador dando lugar al tirante de la sección. Éste término junto a la velocidad de sedimentación de la partícula de arena define la longitud para que ocurra una sedimentación

completa dando lugar al tiempo de retención hidráulica requerido. Luego de tener las dimensiones del desarenador se procede a diseñar la obra de aforo que contralará la operación. Para la investigación se definió un vertedor proporcional del tipo sutro con la función de cuantificar el caudal de circulación además de controlar el tirante para el sistema en general. Los parámetros de diseño del vertedor se determinaron según la expresión empírica determinada por la bibliografía consultada. Finalmente se dimensiona la canaleta de distribución a partir de la velocidad de circulación recomendada (0.6 m/s) por la literatura. Otro elemento de interés para la investigación es la etapa de cribado para el residual compuesto por dos rejillas, una inicialmente gruesa y otra fina según sus dimensiones y espaciado entre barras como se observa en la figura 2.6

Un concepto a tener en cuenta es la generación del dominio del sistema. Esto representa la definición de un volumen de control general que desarrolle el comportamiento dinámico de los fluidos en estudio, por el caso de la investigación se encuentra en presencia de agua y aire. En el dominio mostrado en la figura 2.6 se observa la distribución de las rejillas en la canaleta de distribución.

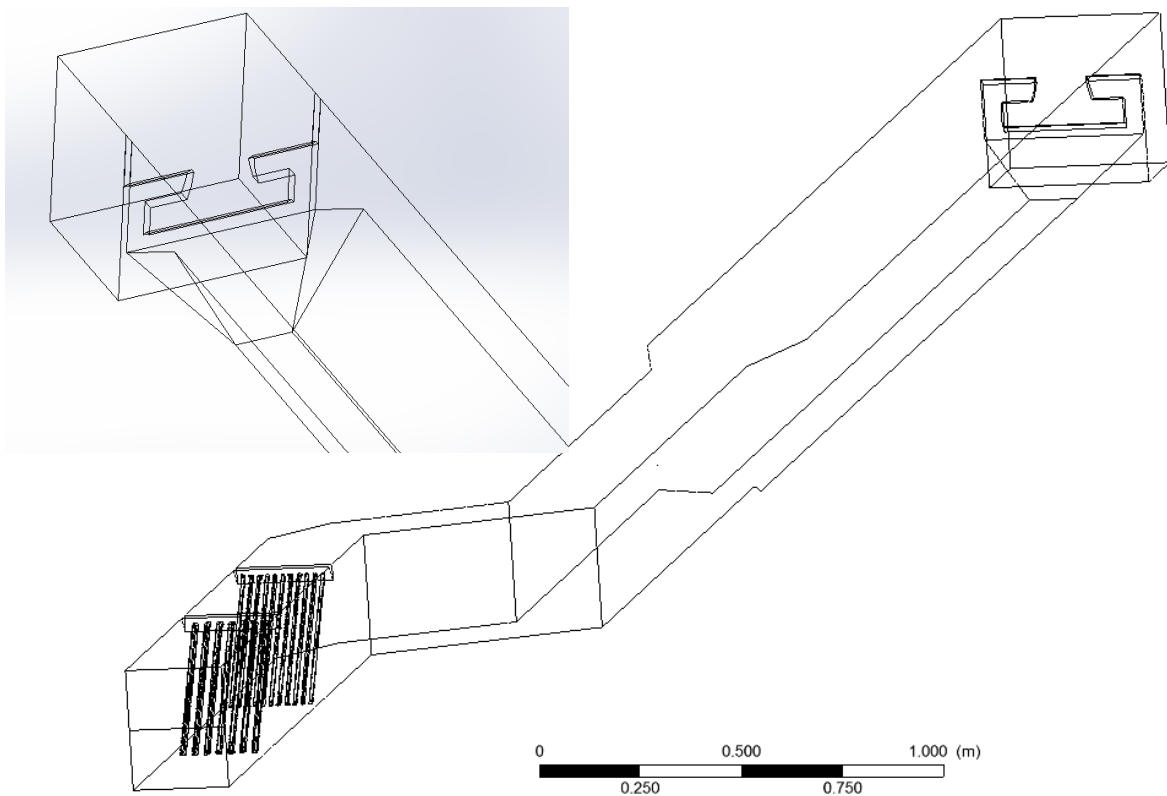


Figura 2.6 Generación del dominio para el sistema de pretratamiento

Las dimensiones y estructura de las rejillas se observan en la figura 2.6 considerándose el valor de la pérdida de carga calculado con la expresión empírica anteriormente mencionada. Luego de tener definido el dominio se procede a discretizar todo su volumen para desarrollar el sistema de ecuaciones que describe el movimiento de la partícula.

2.4.2 Generación del mallado

Para la realización del mallado se optó una malla formada por hexaedros del mismo tamaño llenando el dominio.

El empleo de la malla FS ordenada por sus siglas en inglés (face sizing) corresponden a una función específica del módulo ANSYS- Meshing, en que las celdas cerca de la superficies son más pequeñas que en el resto del dominio. Esta malla ha sido creada a partir de la técnica que ofrece el módulo de mallado adaptado a ANSYS FLUENT denominada Assembly Meshing CutCell Hex Dominant Algorithm.

Este método utiliza un enfoque cartesiano de volumen de mallado, en el que la propagación de las celdas no respeta los límites ni los bordes del dominio a no ser que se especifique una condición de frontera. Aquí, la malla en la superficie de las rejillas y el vertedor se crea de manera automática a partir del límite de las celdas adyacentes del dominio volumétrico alrededor de esta superficie. Así, se reduce el tiempo dedicado a reformar y/o descomponer la geometría donde en el otro enfoque, conocido como generación de malla ordenada body-fitted en multi bloque es necesario realizar.

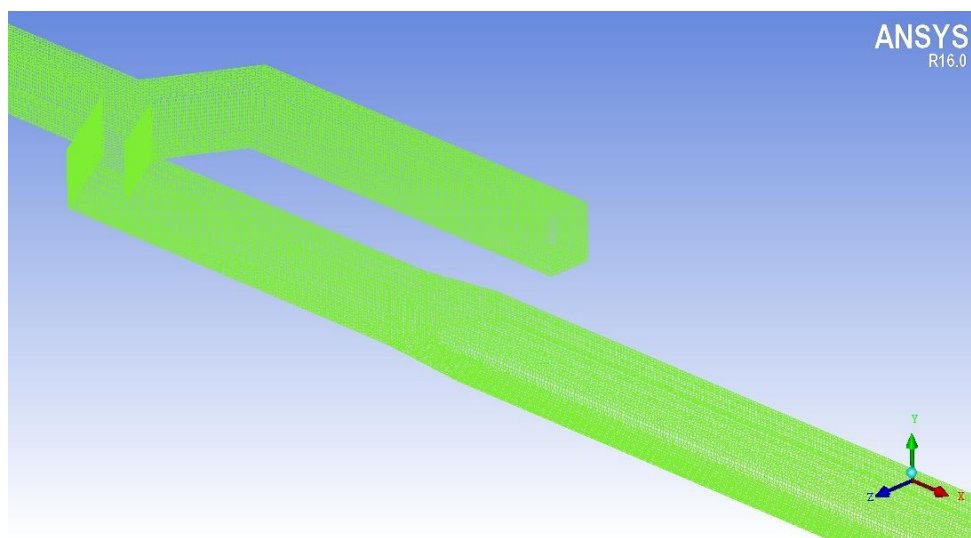


Figura 2.7: Mallado del dominio general del pretratamiento

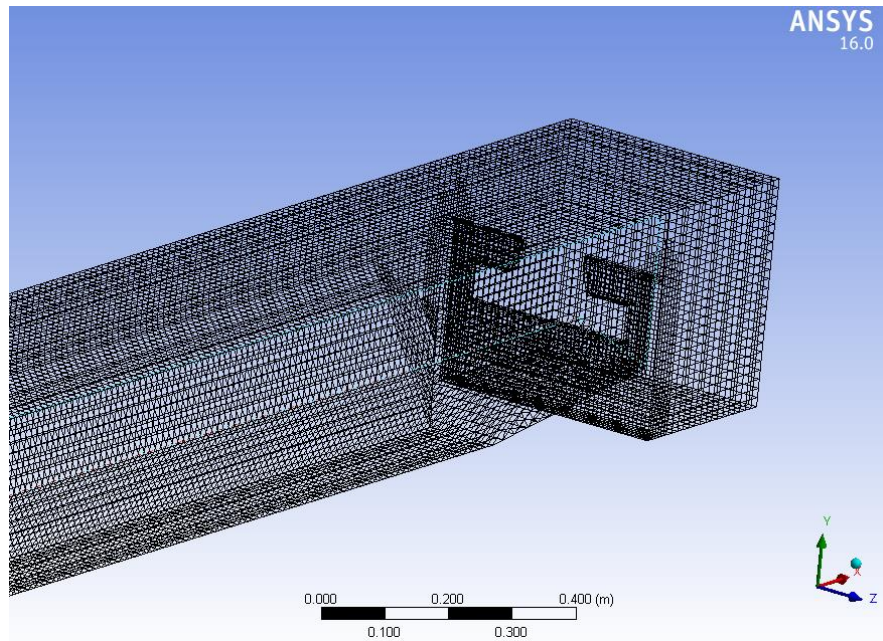


Figura 2.8: Detalles del mallado del vertedor de Sutro

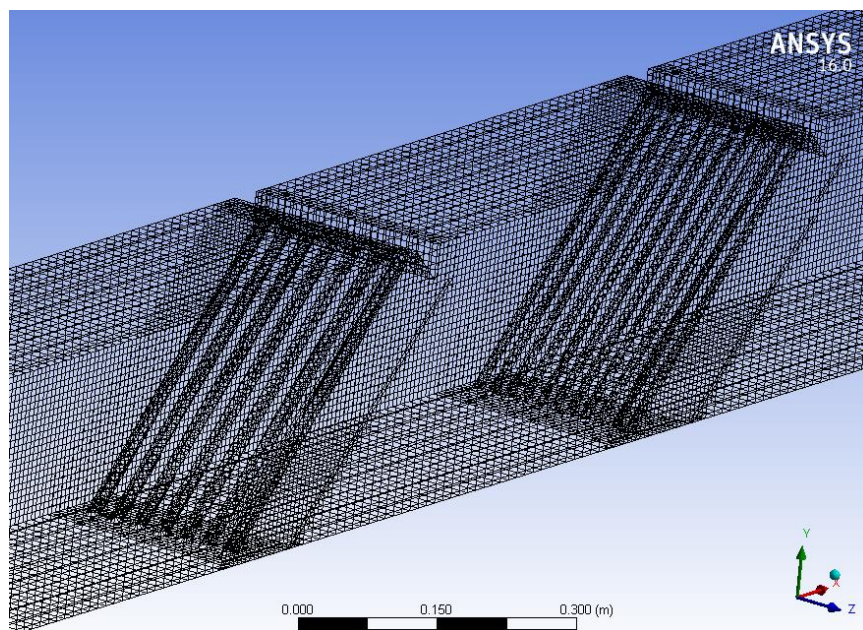


Figura 2.9: Detalle del mallado en las rejillas.

En términos generales, una malla cartesiana CutCell se genera a partir del “corte” de cuerpos sólidos de una malla cartesiana en segundo plano. Una vez el solver está provisto de la información adecuada de la superficie del cuerpo, el siguiente paso de generación de la malla es reemplazado por el cálculo paramétrico de las localizaciones en donde el cuerpo corta con la malla de este segundo plano.

El hecho de tener una geometría en la rejilla y el vertedor un tanto complejo resultó una dedicación considerable en la configuración de este mallado, ya que siendo en todo el dominio celdas del mismo tamaño, hubo que ponerle especial atención en el balance entre la calidad de la malla y el coste computacional.

CAPÍTULO 3. OBTENCIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Análisis de la convergencia

Como ya se ha mencionado en la investigación los parámetros dimensionales y las condiciones de fronteras para el caso de estudio se considerado el siguiente criterio de convergencia en la solución:

Residuales escalados: El criterio estándar de convergencia utilizado por FLUENT se aplica cuando los residuales van decreciendo en cada iteración hasta llegar a valores del orden de 10^{-3} , aceptado por la mayoría de problemas. Sin embargo, en el presente proyecto se ha visto que el decrecimiento de estos residuales se daban de una manera rápida y estable, provocando la parada de la simulación aún sin haberse desarrollado la perturbación de la rejilla en su totalidad, por lo que no se impuso valor de ningún orden a fin de conseguir convergencia.

Como se puede ver en la figura 3.1, cuando se ha conseguido un estado estacionario de flujo los residuales han permanecido estables en órdenes de 10^{-4} y 10^{-5} , exceptuando para las variables de turbulencia, que se han mantenido (aunque no de manera muy estable) en 10^{-3} , dándose por válido.

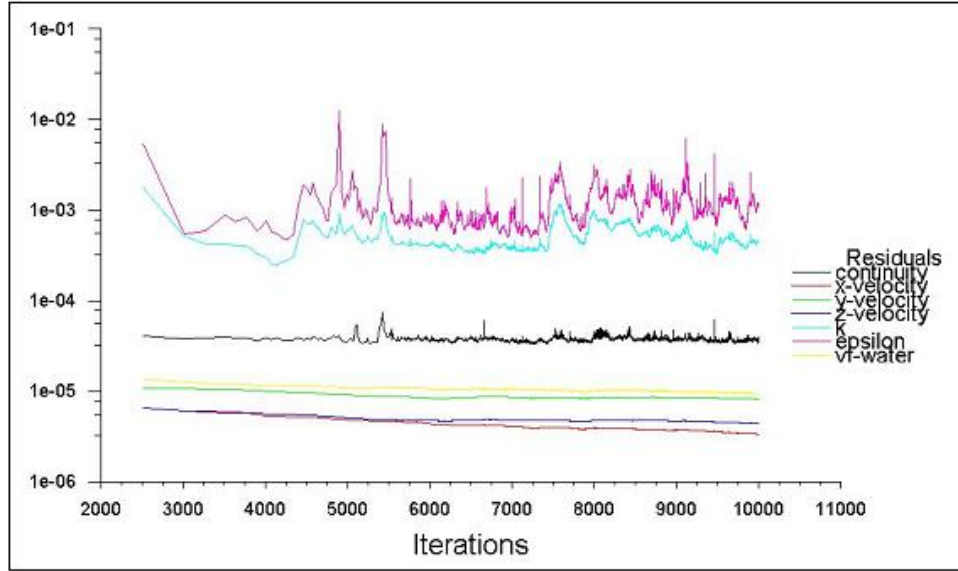


Figura 3.1: Residuales escalados de la modelación hidrodinámica

El Balance de caudal másico global ha sido un criterio muy importante a la hora de decidir la cantidad de iteraciones para conseguir convergencia en la solución. Se ha monitoreado la diferencia entre el caudal másico en la entrada y la salida del dominio, y se ha considerado como solución estable la oscilación del balance final entre 0 y 100 kg/s positivos, suficiente para un dominio de tal magnitud. Como se puede ver en el siguiente gráfico a partir de 5000 iteraciones la oscilación se torna muy llana entre 0 y 100 kg/s positivos aproximadamente.

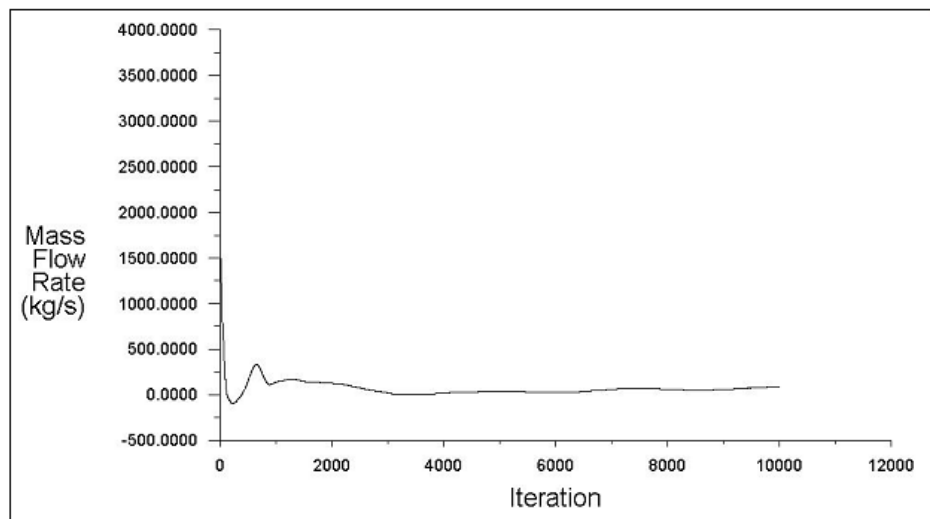


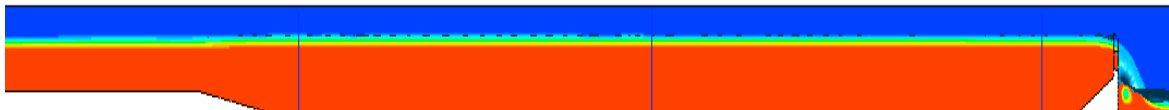
Figura 3.2: Análisis del promedio del flujo del sistema

La solución ha sido computada por un ordenador Intel I5 de 3 GHz y 4GB de memoria RAM. El tiempo empleado por el CPU ha sido de aproximadamente 10 horas y, durante este tiempo, siguiendo los criterios de convergencia descritos, ha realizado poco más de 10 000 iteraciones.

3.2 Desarrollo de la lámina de agua.

Un aspecto fundamental de la modelación numérica computacional es la correlación de sus resultados a partir de fenómenos físicos reproducidos o términos empíricos que le anteceden una experimentación detallada. El caso de la investigación parte de la concepción de un sistema hidráulicamente calculable donde los valores correspondientes al tirante y las velocidades de circulación se definen como parámetros de diseño de la instalación. En otras palabras se cuenta con los términos de referencia para comparar los resultados de la modelación computacional.

Para describir la lámina de agua mediante el modelo de volúmenes finitos en sistemas multifásicos se emplea el concepto de fracción volumétrica definiendo una porción de cada fase en cada elemento del volumen de control. Esto sugiere que en el dominio para las condiciones de la investigación consideradas para un caso bifásico se disponen de celdas llenas de la fase agua y de aire. La interface formada por la difusión entre fases, que no es más que la incertidumbre de la una porción determinada de cada fase en los elementos del dominio representa el desarrollo de la lámina de agua tal como se observa en la figura 3.3 (superior).



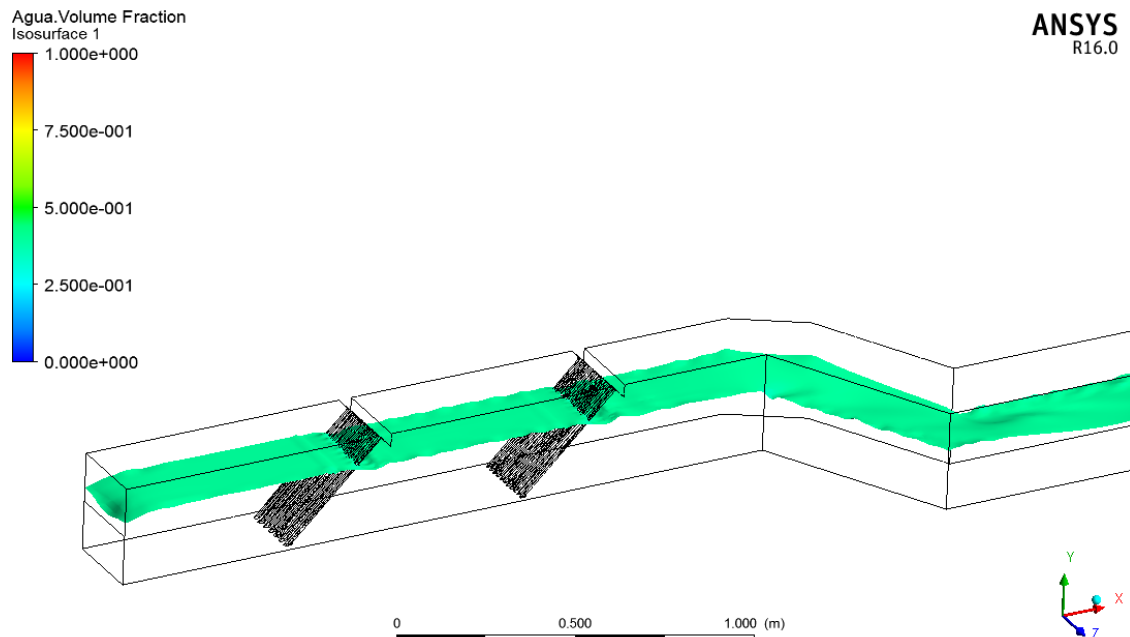


Figura 3.3 Vista lateral de la fracción volumétrica en el desarenador (Superior); y localización de la lámina de agua en la canaleta con rejillas (Inferior)

Esta difusión de la interface se conforma por una escala de fracción volumétrica de una fase a la otra. La definición de que la lámina de agua se desarrolle para las celdas que tiene 50 % de agua y 50 % de aire se obtiene la superficie del fluido tal como se observa en la figura 3.3 (inferior).

Una vez definida la lámina de agua se procede a comparar el comportamiento del fluido respecto a los términos analíticos esperados. Para el caso del desarenador se diseñó una transición que mantenga el tirante desde el punto de vista hidráulico y reduzca las velocidades, términos que se discuten a continuación. Esta Estabilidad del tirante proviene de la carga del vertedor, donde se percibe un diseño estable e hidráulicamente válido para el caudal máximo. Los parámetros de diseño son calculados para el caudal máximo provocando el estudio para la investigación para las condiciones mencionadas.

3.3 Pérdida de carga en el sistema de rejillas

La recomendación por la bibliografía que plantea respecto a la carga admisible para las rejillas es evidentemente imposible debido a que el tirante de circulación en la canaleta es menor que el valor típico recomendado. Esta norma está fundamentada para caudales

significativos que desarrollan un tirante de circulación Se en el orden de los metros y posteriormente el valor recomendado se ajuste perfectamente. El problema comienza cuando se presentan pequeños tirantes como lo es el caso de estudio en la investigación. En la figura 3.4 se representa el comportamiento hidrodinámico de un caudal de 16 L/s a través de las dimensiones recomendadas para rejillas en la literatura especializada.

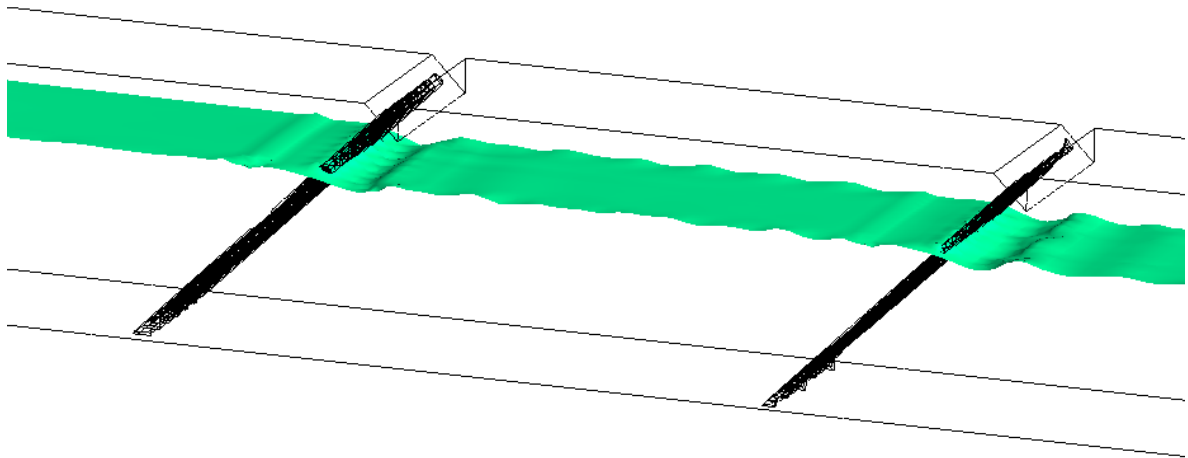


Figura 3.4. Superficie de la lámina de agua durante el cribado mediante rejillas.

Basta señalar que la pérdida de carga para las dimensiones propuestas de la canaleta y el caudal de circulación antes mencionado no representan un valor significativo para el sistema. No obstante, no se debe desestimar esta relación debido a las incrustaciones de los sólidos en la rejilla provocando un aumento significativo de la pérdida y la probabilidad de inundaciones. Por tal motivo se diseña un sistema de baypass secundario que permite circular el flujo ante una obstrucción temporal. Como recomendación sobre esta temática en fase de desarrollo se orienta a futuras investigaciones el estudio del espaciado y espesor de las rejillas con fin de obtener una relación de pérdida de carga admisible en función del tirante de circulación. De ésta forma se pretende establecer la recomendación típica de las dimensiones de las rejillas siempre que considere el caudal y el tirante de circulación para sus valores establecidos.

3.4 Comportamiento hidrodinámico en la canaleta de distribución

La simulación hidrodinámica a partir modelos de turbulencia desarrolla de una manera más real la distribución de las velocidades interiores del sistema. El parámetro de la velocidad en la canaleta de distribución que recomienda la bibliografía está dentro de un rango de 0.35 m/s a 0.6 m/s. Es evidente que la acción de las rejillas provoca una alteración de la distribución de velocidad ocurriendo contornos no uniforme de las mismas tal como se muestra en la figura 3.5.

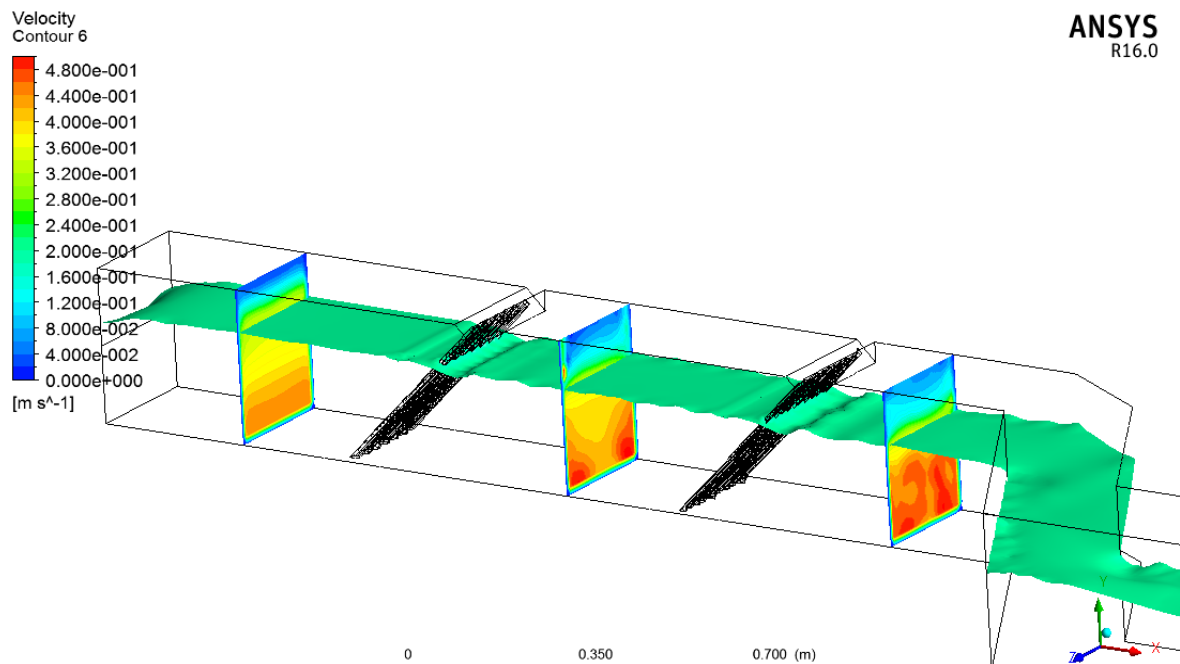


Figura 3.5: Distribución de los contornos de velocidades para el cribado mediante rejillas.

Anteriormente se definió que la pérdida de carga para las condiciones de estudio son insignificantes respecto al tirante de circulación pero no se corresponde de igual forma con las velocidades interiores. En la figura se observa una evolución del contorno de velocidades completamente justificables desde el punto de vista hidráulico. Esto significa que la primera sección antes de la rejilla gruesa desarrolla un contorno con una distribución uniforme del perfil de velocidades.

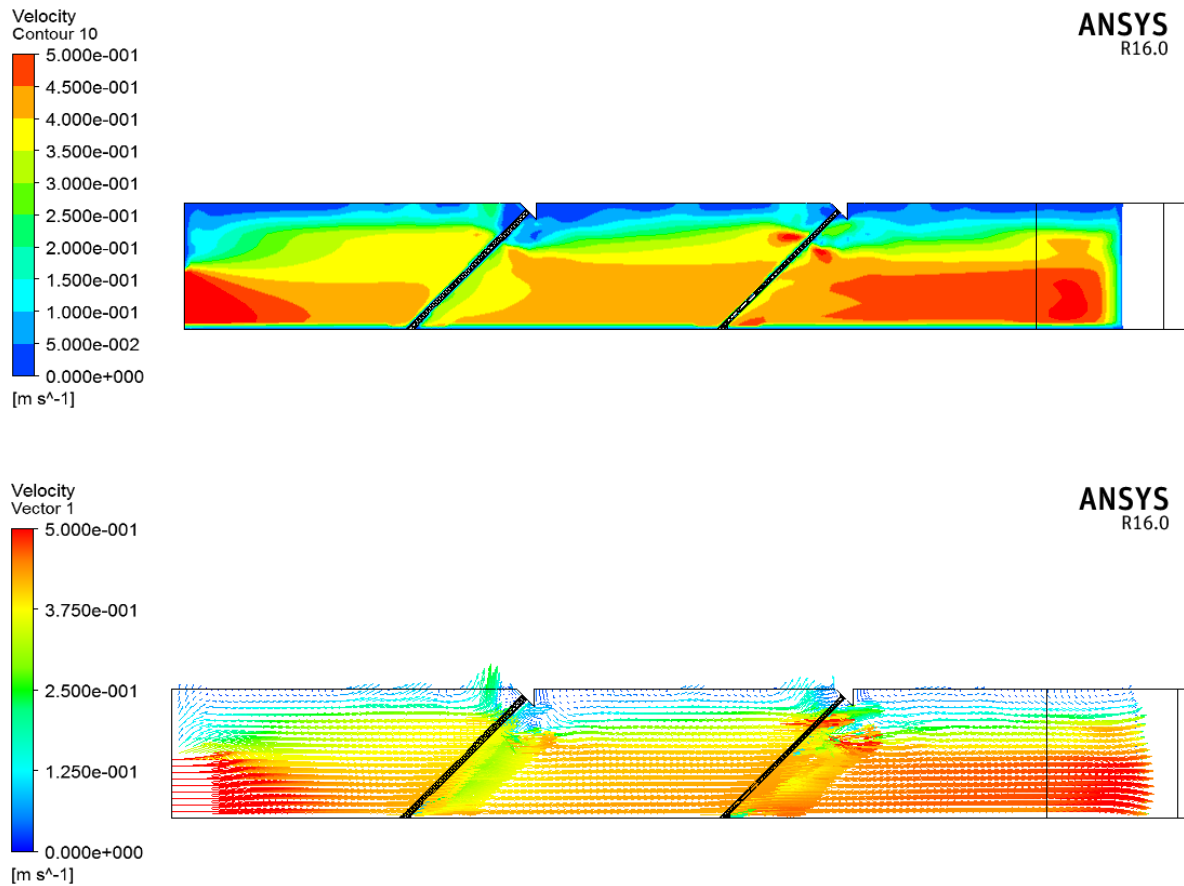


Figura 3.6: Contorno de velocidades en el plano lateral (Superior) y vector (Inferior)

Luego de transcurrir por dentro de la rejilla gruesa como se observa para la sección del medio entre rejillas se describe una primera alteración del contorno, pero como dicha rejillas es gruesa y con espacios significativos no corresponden grandes alteraciones. Finalmente para la sección después de la rejilla fina se presenta una distribución completamente turbulenta y desordenada de los contornos de velocidades tal como se esperaba desde el punto de vista hidráulico.

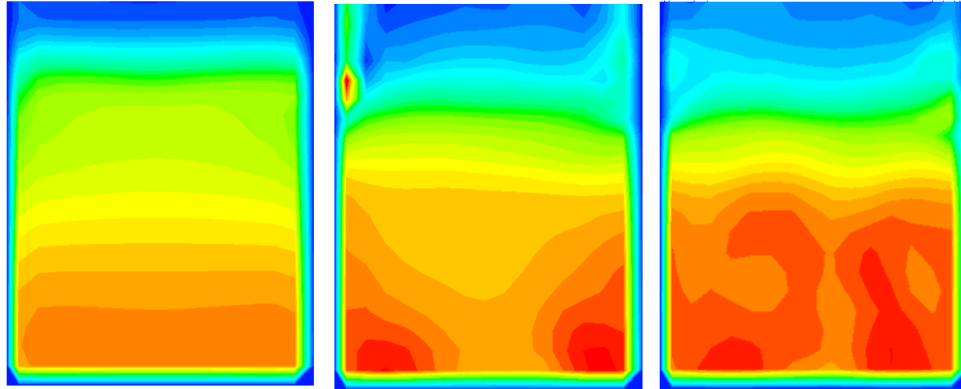


Figura 3.7: Contorno de velocidades para las secciones transversales de la figura 3.5

Realizando una comparación entre los valores máximos y mínimos para la etapa del cribado mediante rejillas gruesas se observan los valores promedios para las secciones en estudio de 0.36 m/s y 0.48 m/s. Dichos términos se ajustan perfectamente para los parámetros típicos recomendados por la literatura y constituye un criterio positivo con respecto al tirante de circulación. Estos valores pueden variar en la práctica si ocurren obstrucciones en la rejilla que provoquen una acumulación parcial de los sólidos en suspensión, por tal motivo se ajustan valores de seguridad que impida la ocurrencia estas situaciones en el sistema.

3.5 Condiciones de hidrodinámicas del desarenador

Una de las etapas más complejas en su diseño e importante para el pretratamiento es la correcta operación del desarenador. Los parámetros hidrodinámicos referidos por la bibliografía establecen restricciones respecto a la velocidad horizontal de circulación. Este término se normaliza debido al control de la operación, es decir desarrollar la suspensión de partículas que impidan el correcto funcionamiento de la instalación. Para decantar las partículas más pequeñas de arena se requiere una velocidad horizontal no mayor de 0.3 m/s definiéndose a partir del fenómeno de la resuspensión. En la figura 3.8 se observan los contornos de velocidades en el plano lateral al centro del sedimentador.

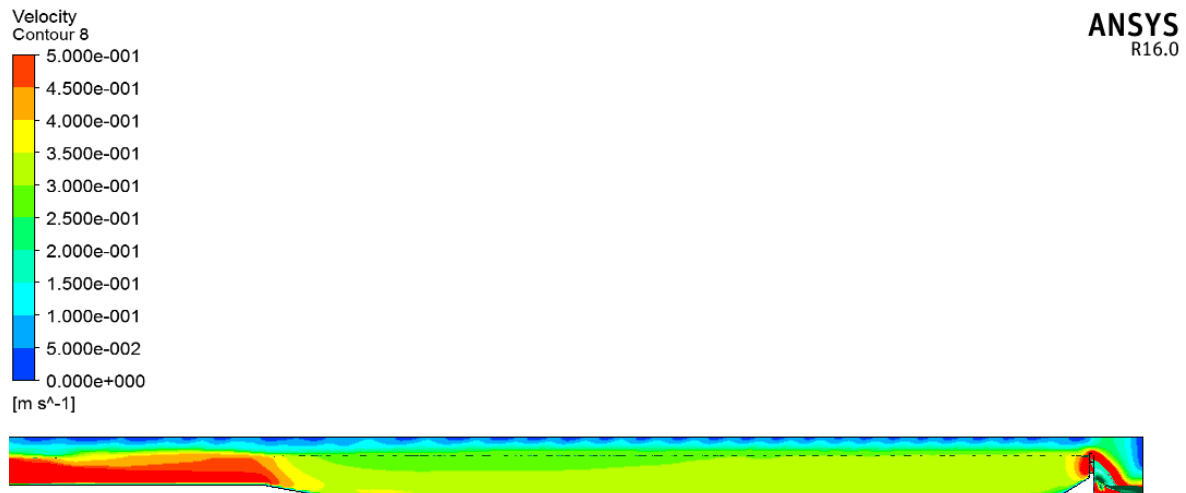


Figura 3.8: Contorno de velocidades en el sedimentar (vista lateral)

Esta información de los contornos de velocidades determina el comportamiento del desarenador. Se observa que la velocidad máxima a lo largo del desarenador es aproximadamente 0.3 m/s siendo las velocidades predominante sobre los 0.25 m/s. En ocasiones el proyectista sobredimensiona los elementos del desarenador provocando velocidades de trayectoria muy inferior a los parámetros hidrodinámicos recomendados ocurriendo la decantación de partículas biológicas que se requieren en etapas posteriores de la instalación.

Los valores antes mencionados se pueden comprobar una vez más para las secciones transversales realizadas al inicio medio y final del sedimentador como se muestra en la figura 3.7. Estas secciones demuestran el desarrollo de una distribución uniforme del perfil de velocidades. Para el correcto dimensionamiento se consideró una longitud adicional que tenga en cuenta la redistribución de las velocidades desde la canaleta y la transición y finalmente las alteraciones producto de la proximidad del vertedor. Por tal razón se dimensionó con una distancia de 5 m para dar lugar a estas situaciones.

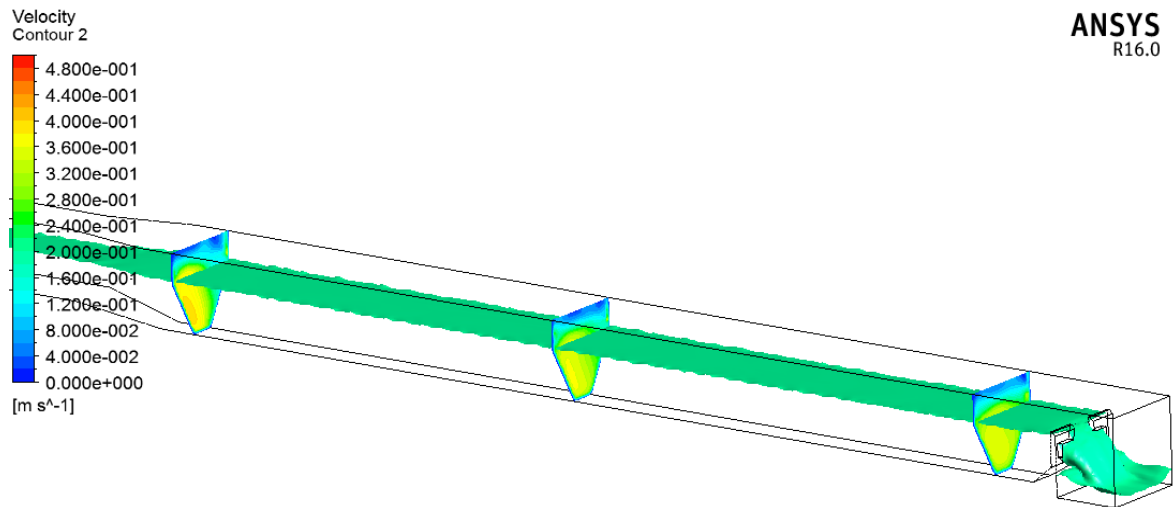


Figura 3.9: Secciones de control para el desarenador

Luego de describir una distribución uniforme en la sección transversal del desarenador se verifica el tirante resultante por la modelación respecto al parámetro de diseño. En el capítulo anterior se definió un tirante para el desarenador de sección transversal compuesta de 0.4 m a partir de una velocidad de trayectoria de 0.3m/s. El resultado que arroja la modelación corresponde a una tirante de 0.399 m como se observa en la figura 3.8, valor completamente válido con respecto al término de diseño

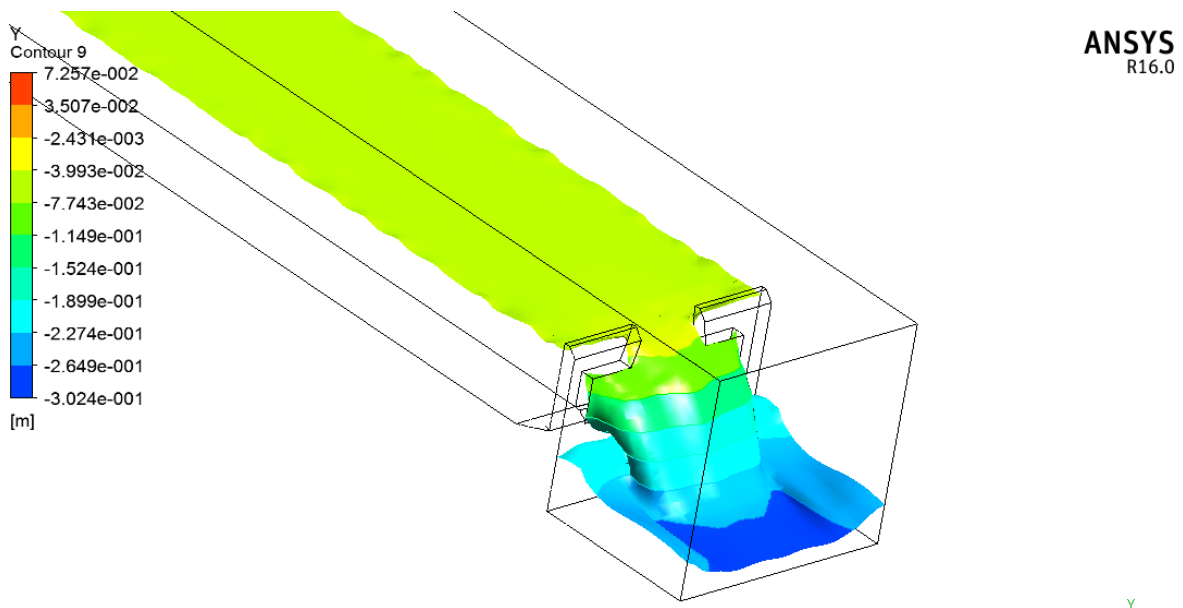


Figura 3.10: Contorno de altura en el eje (y) al final del desarenador.

Finalmente la distribución de velocidades en la superficie del fluido a lo largo de todo el pretratamiento se comporta de manera controlada tal como se muestra en la figura 3.9

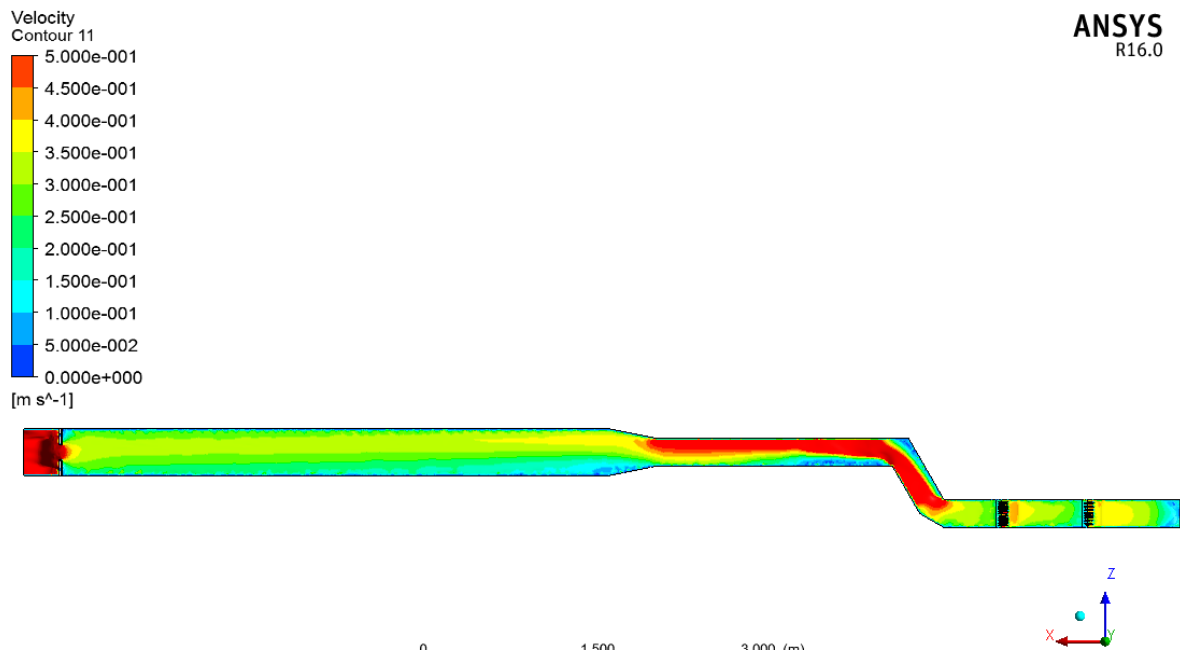


Figura 3.11: Contorno de velocidades en la superficie del fluido (vista superior)

De manera general se observa una distribución de velocidades acertadas desde el punto de vista hidráulico debido a las transformaciones que ocurren durante todo el sistema. Inicialmente en las rejillas del cribado se observa una perturbación de las velocidades hasta llegar a una trayectoria con un valor máximo de 0.5 m/s debido a la curvatura de la canaleta de distribución. Luego ocurre la transición provocando un descenso de las velocidades y la organización de las mismas durante el desarenador. Posteriormente en las cercanías del vertedor ocurre la caída libre del flujo así como el aumento de las velocidades. Generalmente se requiere de diversas dimensiones para el desarenador producto del tamaño de la partícula a sedimentar. Para el caso de la investigación se definió a decantar la partícula de arena más pequeñas arrojando dimensiones significativas desde el punto de vista hidráulico, no obstante es posible obtener otras relaciones geometrías a partir de la consideración de otros tamaños de partículas.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- 1 Se establecieron las bases teóricas para el diseño hidráulico del pretratamiento en pequeñas plantas depuradoras de residuales así como las consideraciones requeridas para la modelación hidrodinámica a partir de las técnica computacionales.
- 2- Se definieron los parámetros geométricos de la propuesta de diseño a partir de los conceptos de la hidráulica de canales conformándose un dominio adecuado a las condiciones de operación.
- 3- Se obtuvieron los valores que describen el comportamiento hidrodinámico destacándose el comportamiento de la velocidad para el desarenador como (0.3 m/s) adecuado a los parámetros de diseño por la norma.

Recomendaciones

- 1- Realizar la modelación propuesta para distintos casos donde varíe los términos de caudal, tamaño de partícula, geometría de las rejillas y tipo de medidor de caudal para determinar la sensibilidad de los términos en estudio.
- 2- Correlacionar los resultados de la modelación con resultados experimentales para validar la documentación obtenida.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, I. (2014). (n.d.). ANSYS FLUENT Theory Guide Release for 16.

Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics.

De Azevedo, J. M. y G. A. A. (1976). Manual de Hidráulica. *Mexico: Harla*, 578 pp.

Dorado, M. D. D. (1993). Urbanismo Sanitario. *Buenos Aires – Argentina*.

Eddy, M. &. (n.d.). Ingeniería de Aguas Residuales. *España, Tercera Ed.*

Erdbrink, C. D., Krzhizhanovskaya, V. V, & Slood, P. M. A. (n.d.). Free-surface flow simulations for discharge-based operation of hydraulic structure gates, 1–25.

Guan Heng Yeoh, J. T. (2010). Computational techniques for multiphase flows. *Butterworth-Heinemann, UK*.

Hernández, A. (2000). Manual de Depuración Uralita. *España, Segunda Ed.*

Hidalgo, J. J. T. (1999). Aplicación de Modelos Numéricos al Estudio de la Hidrodinámica y del Flujo de Partículas en el Mar Mediterráneo .

LUX MONROY, M. A. (2010). Medidores de flujo en canales abiertos. *Trabajo de Graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala*, 109p.

VILLÓN BÉJAR. (1995). Hidráulica de canales. *Cartago: Tecnológica de Costa Rica*, 487 p.

White, F. M. (2008). Mecánica de fluidos. *McGraw-Hill, España*.

Yactano, I. V. M. (n.d.). Sedimentación, *Capítulo 7*.

