



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

“Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de
tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e
internacionales”

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

AUTOR:

Canaza Cañazaca, Willi Ivan (ORCID: 0000-0002-1606-6683)

ASESOR:

Mg. Clemente Condori, Luis Jimmy (ORCID: 0000-0002-0250-4363)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Diseño de obras hidráulicas y saneamiento

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria

De: Canaza Cañazaca, Willi Ivan

Dedico con todo mi corazón mi tesis a mi compañera de vida Melania, por creer en mi capacidad y apoyarme sin condiciones, pues sin ella no lo habría logrado.

A mis padres Pamfilo y Maria, quienes cuidan y guían mi camino desde el cielo.

A mis familiares quienes con sus palabras de aliento me motivaron a seguir.

Agradecimiento

De: Canaza Cañazaca, Willi Ivan

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, quien nos da vida y salud a todos,

Agradezco también a la Universidad Cesar Vallejo, por darme la oportunidad de completar mi sueño de ser un Ingeniero Civil.

Así mismo agradezco a mi asesor de Tesis Mg. CLEMENTE CONDORI, Luis Jimmy, por haberme apoyado con su capacidad y conocimiento.

Finalmente agradezco a todos los que de alguna manera me han apoyado en este largo camino de lograr uno de mis sueños.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Índice de Contenidos	iv
Índice de tablas	v
Índice de figuras	viii
Índice de abreviaturas	x
Resumen	xi
Abstract	xii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. MARCO TEÓRICO	5
III. METODOLOGÍA	15
3.1. Tipo y diseño de investigación	15
3.2. Variables y operacionalización	16
3.3. Población, muestra, muestreo	17
3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad	17
3.5. Procedimientos	18
3.6. Método de análisis de datos	80
3.7. Aspecto ético	80
IV. RESULTADOS	81
V. DISCUSIÓN	95
VI. CONCLUSIONES	96
VII. RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS	98
ANEXOS:	103

Índice de tablas

Tabla 1. Simuladores para diseño y modelador de PTAR	7
Tabla 2. Composición típica de aguas residuales municipales	11
Tabla 3. Concentración de microorganismos en aguas residuales.....	11
Tabla 4. Valores ECAs, LMP, VMA y Banco Mundial.	12
Tabla 5. Operacionalización de variables	16
Tabla 6. Rangos de validez y confiabilidad	18
Tabla 7. Tecnologías para las PTAR	20
Tabla 8. Combinación de tecnologías en diferentes etapas	21
Tabla 9. Sistemas con diferentes niveles de remoción de contaminantes.....	21
Tabla 10. Relación de nivel de complejidad, población y periodo de diseño	23
Tabla 11. Dotaciones de agua potable recomendadas.....	24
Tabla 12. Aportes per cápita de contaminantes, según normas	26
Tabla 13. Criterios de diseño de rejillas de limpieza manual, según normas	28
Tabla 14. Cantidad de material cribado	28
Tabla 15. Criterios de diseño de desarenadores, según normas.....	33
Tabla 16. Relación entre diámetro de partículas y velocidad de sedimentación..	34
Tabla 17. Fórmulas de caudales en canales Parshall.....	35
Tabla 18. Dimensiones de canaleta Parshall, de acuerdo a la figura 8	36
Tabla 19. Parámetros de diseño de trampas de grasa, según normas.....	40
Tabla 20. Normas suizas para dimensionamiento de separadores de grasas.....	41
Tabla 21. Relación del tiempo de permanencia y caudal de afluente	41
Tabla 22. Criterios de diseño de sedimentadores, según normas.	44
Tabla 23. Porcentaje de remoción de contaminantes	44
Tabla 24. Gravedad específica y concentración de lodos.....	45
Tabla 25. Factor de corrección por influencia del vertedero	45

Tabla 26. Criterios de diseño de tanque Imhoff, según normas.....	48
Tabla 27. Factores de capacidad relativa por temperatura.....	49
Tabla 28. Parámetros de diseño de lagunas anaeróbicas, según normas	52
Tabla 29. Relación temperatura, tiempo de remoción y eficiencia.....	52
Tabla 30. Valores recomendados de carga máxima aplicable.....	53
Tabla 31. Parámetros de diseño de lagunas facultativas, según normas	56
Tabla 32. Parámetros de diseño de filtros biológico, según normas.....	61
Tabla 33. Criterios de diseño de RAFA, según normas	64
Tabla 34. Tiempos de retención hidráulicos para diferentes temperaturas.....	65
Tabla 35. Parámetros de diseño de fafa, según normas	70
Tabla 36. Parámetros de diseño de lagunas de maduración, según normas	72
Tabla 37. Criterios de diseño de digestores de lodos, según normas.....	76
Tabla 38. Criterios de diseño para lecho de secado de lodos.....	78
Tabla 39. Datos para determinar área de lecho de secado de lodos.....	79
Tabla 40. Estimación de población de diseño.....	81
Tabla 41. Resultado de caudales de diseño.	82
Tabla 42. Resultado de características del afluente	82
Tabla 43. Dimensiones de canal de ingreso y cámara de rejillas.....	82
Tabla 44. Diseño de desarenador controlado por aforador Parshall.....	83
Tabla 45. Dimensiones de desarenador controlado por vertedero Sutro	84
Tabla 46. Dimensiones de desengrasador	85
Tabla 47. Resultados del diseño del sedimentador primario	86
Tabla 48. Resultados de diseño de un tanque Imhoff.....	87
Tabla 49. Dimensiones de lagunas anaeróbicas	88
Tabla 50. Dimensiones de lagunas facultativa.....	89
Tabla 51. Dimensiones de filtros biológicos o percoladores	89

Tabla 52. Dimensiones de RAFA.....	90
Tabla 53. Dimensiones de FAFA	91
Tabla 54. Dimensiones de laguna de maduración	92
Tabla 55. Dimensiones de digestor de lodos	93
Tabla 56. Dimensiones de lecho de secado de lodos	94

Índice de figuras

Figura 1. Cámara de rejas mal diseñadas.....	1
Figura 2. PTAR con un sistema de poca intervención mecánica	8
Figura 3. Etapas de sistemas de tratamiento de aguas residuales	9
Figura 4. Selección del sistema de tratamiento.....	19
Figura 5. Esquema de PTAR de aguas servidas domésticas	19
Figura 6. Esquema de elección de sistema.....	22
Figura 7. Vista de una cámara de rejas.....	29
Figura 8. Configuración de la Canaleta Parshall	35
Figura 9. Sección del Desarenador controlada por Parshall	37
Figura 10. Forma del Vertedero Sutro.....	39
Figura 11. Vista de un desengrasador en funcionamiento	41
Figura 12. Esquema general de zonas de un sedimentador	44
Figura 13. Batería de sedimentadores primarios en funcionamiento	45
Figura 14. Esquema general de un tanque Imhoff	49
Figura 15. Esquema de laguna anaerobia	53
Figura 16. Esquema de una laguna facultativa	57
Figura 17. Esquema de un filtro percolador	61
Figura 18. Esquema de un RAFA.....	65
Figura 19. Esquema funcional de FAFA.....	70
Figura 20. Vista de una laguna de pulimento o maduración	73
Figura 21. Esquema de un digestor convencional.....	77
Figura 22. Esquema de un lecho de secado de lodos.....	79
Figura 23. Forma típica de canal de ingreso y cámara de rejas.....	83
Figura 24. Plana y perfil de desarenador con aforador Parshall	84
Figura 25. Sección típica del desarenador	84

Figura 26. Forma del desarenador controlado por vertedero sutor	85
Figura 27. Forma de trampa de grasas	85
Figura 28. Forma de un sedimentador primario rectangular	86
Figura 29. Vista en planta de un tanque Imhoff	87
Figura 30. Vista de sección de tanque Imhoff	88
Figura 31. Forma de lagunas anaeróbicas	89
Figura 32. Sección transversal de laguna facultativa	89
Figura 33. Forma del filtro biológico	90
Figura 34. Forma de RAFA	91
Figura 35. Sección transversal de FAFA y detalle de base de medio filtrante	91
Figura 36. Planta y perfil de FAFA	92
Figura 37. Forma de laguna de maduración	93
Figura 38. Forma de un digestor de lodos circular	93
Figura 39. Forma de lecho de secado de lodos	94

Índice de abreviaturas

CEPIS	: Centro panamericano de ingeniería sanitaria
CONAGUA	: Comisión nacional del agua – México
CF	: Coliformes fecales
DBO	: Demanda bioquímica de oxígeno
DIGESBA	: Dirección general de saneamiento básico
DQO	: Demanda química de oxígeno
ECA	: Estándares de calidad ambiental
FAFA	: Filtro anaeróbico de flujo ascendente
INEI	: Instituto nacional de estadística e informática
LMP	: Límites máximos permisibles
MAPAS	: Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento
MINAM	: Ministerio del ambiente
NB	: Norma boliviana
OMS	: Organización mundial de la salud
OPS	: Organización panamericana de la salud
PTAR	: Planta de tratamiento de aguas residuales
PTARM	: Planta de tratamiento de aguas residuales municipales
RAFA	: Reactor anaeróbico de flujo ascendente
RAS	: Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico
RNE	: Reglamento nacional de edificaciones
SST	: Sólidos suspendidos totales
SUNASS	: Superintendencia nacional de servicios de saneamiento
VMA	: Valores máximos admisibles

Resumen

Objetivos: Se buscar la optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales comparando criterios de diseño hidráulico de normas nacionales e internacionales, para ello se define el método adecuado de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales clasificado parámetros por componente, además, se conforma posibles combinaciones de tecnologías de tratamiento diseñando cada componente, para así obtener sistemas eficientes de tratamiento con una correcta elección de componentes. Metodología: se usó el método lógico deductivo con un nivel exploratorio y descriptivo, donde se realizó una comparativa de criterios de diseño hidráulico de componentes de plantas de tratamiento de aguas residuales en normas peruanas, bolivianas, colombianas y mexicanas; además se revisó teorías referentes a diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales en conjunto y por componentes; se propuso formas de combinar los componentes para obtener sistemas eficientes de tratamiento de aguas residuales; finalmente se estableció un proceso de diseño de cada componente de una planta de tratamiento de aguas residuales. Resultados: se muestran resultados de diseños hidráulicos realizados con los procedimientos propuestos, para condiciones de una localidad con un clima frío con temperatura promedio de 10°C y viviendas con áreas de construcción de mayores a 90 m², cuya caracterización se ha realizado de acuerdo a las normas consultadas. Conclusiones: Los diseños realizados con los procedimientos planteados, pueden decirse optimizados ya los procedimientos usados se dedujeron de las normas consultadas a partir de las comparativas, los criterios y parámetros tomados en los procesos de diseño que se han tomado, son los parámetros con mayor semejanza de entre las normas y se han incluido de la manera más coherente posible.

Palabras Claves: optimización, criterios, normas, componentes.

Abstract

Objectives: To seek the optimization of wastewater treatment plants by comparing hydraulic design criteria of national and international standards, for this, the appropriate method of design of wastewater treatment plants is defined, classified parameters by component, in addition, possible combinations of treatment technologies designing each component, in order to obtain efficient treatment systems with the correct choice of components. **Methodology:** the logical deductive method was used with an exploratory and descriptive level, where a comparison of hydraulic design criteria of components of wastewater treatment plants was carried out in Peruvian, Bolivian, Colombian and Mexican standards; In addition, theories regarding a design of wastewater treatment plants as a whole and by components were reviewed; ways to combine the components to obtain efficient wastewater treatment systems were proposed; finally, a design process was established for each component of a wastewater treatment plant. **Results:** results of hydraulic designs carried out with the proposed procedures are shown, for conditions of a locality with a cold climate with a temperature of 10°C and homes with construction areas greater than 90 m², whose characterization has been carried out according to the standards consulted. **Conclusions:** The designs made with the procedures proposed, can be said optimized, and the procedures used were deduced from the standards consulted from the comparatives, the criteria and parameters taken in the design processes that have been taken, are the parameters with greatest similarity between the standards and have been included as consistently as possible.

Keywords: optimization, criteria, standards, components.

I. INTRODUCCIÓN

El tema de diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) es bastante crítico en nuestro entorno, puesto que existen muchos proyectos de saneamiento básico que proponen la construcción de estas PTAR, pero no son ejecutadas debido a las deficiencias que presenta su diseño y los que son construidas tienen un funcionamiento deficiente.

De acuerdo a (SUNASS, 2015), en el diagnóstico realizado a las plantas operadas por entidades prestadoras de servicio de saneamiento, encontraron que, más del 90% no cuentan con autorización para la descarga o reutilización de las aguas y lodos que fueron tratados; respecto al diseño y construcción, detectaron defectos en la construcción y falta de unidades de tratamiento preliminar; en cuanto a la selección de alternativas, no se cubren los costos elevados de operación y mantenimiento, es por ello que falta de mantenimientos en las del 50% de las PTAR donde presentan sobrecarga hidráulica u orgánica y falta la remoción de lodos, además, no tienen manuales y programas adecuados para la etapa de operación.

Actualmente, el diseño hidráulico de las plantas de tratamiento de aguas residuales, son realizados tradicionalmente (manual y/o con apoyo de hojas de cálculo), esto debido a la carencia de herramientas computacionales (software) que ayuden a realizar este proceso de manera eficiente y confiable. Es así que sale a relucir que las hojas de cálculo que puedan ser usadas en el diseño de PTAR, no tienen un sustento basado en normativas vigentes o en el peor de los casos no tienen algún sustento. En la figura 1, se aprecia ejemplos de errores que se cometen al diseñar unidades de pretratamiento, donde o cumplen con la carga hidráulica.



Figura 1. Cámara de rejas mal diseñadas

Fuente: extraído de (SUNASS, 2015).

Para darle solución de esta problemática, se realiza esta investigación que contemplará la evaluación de cuatro normas (RNE de Perú, RAS de Colombia, NB 688-01 de Bolivia y MAPAS de México), donde se realizará una comparativa de los criterios de diseño hidráulico de las PTAR por etapas y componentes, con el fin de definir un método de diseño de cada componente, para así poder elegir un sistema de tratamiento adecuado, de esta manera se pretende optimizar las PTAR en el proceso de diseño hidráulico, mediante el uso de los criterios comparativos de diseño hidráulico, en base a las normas mencionadas.

Formulación del problema

Se aborda la siguiente formulación del problema general: ¿Cómo los criterios comparativos de diseño hidráulico basados en normas nacionales e internacionales optimizan plantas de tratamiento de aguas residuales?, asimismo, los problemas específicos: 1) ¿Con la clasificación de parámetros adecuados se definiría el método adecuado de diseño de una PTAR utilizando los criterios comparativos de diseño hidráulico?, 2) ¿Con el diseño de cada componente se conformarían posibles combinaciones de tecnologías de tratamiento de aguas servidas aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico? y 3) ¿Con una correcta elección de los componentes de una PTAR se definirían sistemas eficientes aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico?; que permiten desglosar el problema general.

Justificación del estudio

De acuerdo a (Hernández Sampieri, y otros, 2014), la justificación de una investigación, es la explicación de razones sobre la conveniencia de hacer la investigación, así mismo los beneficios que de ésta derivarían. A partir de este concepto, nace la siguiente interrogante: ¿por qué es conveniente y qué beneficios derivarían al realizar la investigación?

Respondiendo a la primera parte; se analizaron y emplearon teorías existentes acerca de los procesos de diseño hidráulico de las PTAR, por otra parte, se realizó comparativas importantes de normas vigentes nacionales e internacionales que rigen los procesos de diseño con parámetros estándares. Esto realza su importancia ya que podrá quedar como una base teórica para posteriores proyectos de investigación orientados a este tipo de tema, por tal motivo es conveniente realizar esta investigación.

Así mismo se responde la segunda parte; los beneficios que se tendrían a realizar esta investigación serían: Establecer métodos para el diseño hidráulico de plantas de tratamiento de aguas servidas más eficientes, la investigación será de ayuda para aquellos profesionales que realizan la elaboración de expedientes técnicos de saneamiento donde incluyan el tratamiento de aguas residuales, así mismo, también será ser de gran utilidad como material didáctico para los estudiantes de las diferentes ingenierías que estudian acerca de tratamiento de aguas residuales y de más beneficios.

Objetivos

Se plantea como objetivo general: la optimización de plantas de tratamiento de aguas negras o residuales comparando criterios de diseño hidráulico de normas nacionales e internacionales. Así mismo los objetivos específicos son los siguientes: 1) Definir el método adecuado de diseño de una PTAR clasificado parámetros, utilizando los criterios comparativos de diseño hidráulico, 2) Conformar posibles combinaciones de tecnologías de tratamiento de aguas residuales diseñando cada componente, aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico, 3) Definir sistemas eficientes de tratamiento con una correcta elección de componentes, aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico.

Hipótesis

De acuerdo a (Hernández Sampieri et al, 2014), las hipótesis muestran lo que intentamos probar y se definen como explicaciones esperadas del fenómeno estudiado, pero, el alcance inicial de la investigación es el factor que define si se formulan o no. Para que un estudio formule hipótesis, su alcance debe ser correlacional, explicativo o descriptivo que intenta predecir una cifra o un hecho.

De acuerdo a lo considerado, y tomando en cuenta que el alcance de esta investigación es descriptivo que no está destinado a predecir un hecho o dato, no se plantea hipótesis alguna.

Delimitaciones

Espacialmente, este trabajo consta de la revisión de normas nacionales e internacionales, así que no tiene una limitación espacial.

Temporalmente, este trabajo se realizó en un tiempo aproximado de 4 meses, desde abril a julio del 2021.

Alcance, este trabajo está orientado para el diseño de plantas para poblaciones desde 500 hasta 30000 habitantes, plantas de tipo biológicos y sin intervención mecánica.

II. MARCO TEÓRICO

Antecedentes

Se tiene a (Valencia López, 2013), en su tesis: “Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la cabecera parroquial de San Luis – Provincia de Chimborazo en Riobamba – Ecuador”, en el que tiene como objetivo principal diseñar una planta de tratamiento para las aguas servidas de la cabecera parroquial de San Luis, provincia de Chimborazo. La metodología empleada fue el siguiente: primero determinar caudales de descarga de manera empírica, posteriormente realizó la caracterizó tanto física, química y microbiología las muestras de las aguas servidas, seguidamente con la ayuda realizó los cálculos correspondientes de diseño con la ayuda del programa EXCEL y para los dibujos el AUTOCAD. Como resultado, replanteó una red de combinada de alcantarillado y diseñó una planta de tratamiento que comprende tres etapas: dos tratamientos tradicionales y un proceso de depuración natural; Asimismo, estimó su eficiencia de eliminación de contaminantes del 83% en promedio, cumpliendo de efectivamente con las regulaciones ambientales de su país.

Se tiene también a (Quiroz Pedraza, 2009), con su tesis: “Planta de tratamiento de aguas residuales para regadío en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos”, en el que su objetivo fue, realizar el diseño de una planta de tratamiento de agua residual, para la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). La metodología utilizada fue: establecer los estudios básicos necesarios que se deben realizar, donde se establecen también los parámetros de diseño como línea de base; seguidamente, conocer las diversas alternativas de PTAR que pueden ser plausibles a ser sugeridas inicialmente, para que finalmente sean evaluadas, discutidas y se tome una decisión. El resultado de este trabajo, son los cálculos realizados tanto en su diseño, costos de construcción y operación.

También tenemos a (Casanova Álvarez et al, 2014), con su tesis: “Diseño de una planta de tratamiento para los efluentes líquidos domésticos del Distrito de Chancay”, cuyo objetivo principal fue, realizar el diseñar una planta para tratar aguas servidas domésticas, generadas en el distrito de Chancay para su descarga al cuerpo receptor. Su método empleado fue: primero fijar los puntos de control en cada uno de los lugares de descarga, donde realizaron monitoreo de los efluentes

en base a las propiedades fisicoquímicas, obtuvieron los parámetros de diseño, seguidamente se estableció un sistema de tratamiento aerobio, por producir poco lodo, además este sistema genera menos olores a comparación del tratamiento anaerobio. Como resultado se concluyó que, la propuesta puede reducir la contaminación, el cual estará entre los estándares de calidad ambiental (ECA) y los límites máximos permisibles (LMP).

También tenemos a (Cristiancho Bello et al, 2016), en su tesis: "Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para PELIKAN Colombia S.A.S.", en el que su objetivo principal fue, realizar un diseño teórico de la planta de tratamiento de aguas servidas industriales para PELIKAN COLOMBIA S.A.S. Donde autor empleó la metodología siguiente: En primer lugar, realizó el diagnóstico del afluente con un laboratorio externo, donde se evalúan los parámetros del agua y sus características para determinar los parámetros importantes; luego propuso algunas alternativas de sistemas de tratamiento, evaluando cada una de ellas bajo los porcentajes de depuración teóricos; luego realizaron el experimento para simular las condiciones de operación y las tasas de depuración de contaminantes experimentales; finalmente, dimensionaron los equipos usados en el tratamiento del afluente y para estimar los costos de inversión y operación de la planta. Como resultado, a la evaporación de los alcoholes como la alternativa más eficaz que puede eliminar hasta del 89.8% de DQO, cumpliendo con las normas.

Podemos mencionar también a (González Manosalva et al, 2012), con su artículo de revista: "Diseño conceptual de una estación experimental de tratamiento de aguas residuales domésticas orientada a municipios con población menor a 30,000 habitantes". Su objetivo fue, realizar el diseño de una PTAR de manera teórica y experimental cumpliendo la normativa vigente colombiana, para localidades hasta con 30000 habitantes. La metodología incluyó, la búsqueda de información del estado del arte y diseño, en experiencias nacionales, continentales y globales. Y como resultado muestra que, para tratar un caudal de 1.5 l/s que son para 850 habitantes aproximadamente, es necesario un área de 18000 m² de construcción, cuyo costo de la planta sería aproximadamente 850 millones de pesos colombianos.

Se puede mencionar a (Sepulveda M. et al, 2017), en su trabajo de investigación: “Guía y herramienta computacional para el diseño hidráulico de un sistema de tratamiento preliminar (cribado y desarenador) de aguas residuales”. Donde tuvo como objetivo: Elaborar un guía y metodología de diseño hidráulico para dimensionar un sistema de pretratamiento de aguas servidas, y basado en ellos elaborar una herramienta computacional que permita realizar su diseño. La metodología que uso, consistió en la búsqueda de información sobre el diseño de unidades de pretratamiento de aguas servidas. El resultado fue, desarrollar la herramienta computacional con la ayuda de macros en Excel, y concluyó que, el aplicativo formulado facilita el proceso de diseño de la cámara de rejas y desarenador.

Por otra parte, se tiene (Sánchez Ramirez et al, 2015), con su artículo de revista: “Software de ingeniería especializado en el diseño y simulación de plantas de tratamiento de agua residual: revisión”, su objetivo fue, mencionar y revisar las herramientas computacionales existentes más utilizados para simular y diseñar plantas tratamiento de agua residual. La metodología aplicada fue, la revisión de literatura referente al tema de investigación, además que, menciona y analiza los diferentes softwares desde el punto de vista de su aporte en la evaluación del rendimiento, control y la optimización de las plantas. Este artículo concluye que, los programas revisados son herramientas de gran ayuda y de fácil manejo para el diseño, simulación y optimización de plantas y que a la fecha estos programas se han utilizado en diversos entornos con resultados satisfactorios. En la tabla 1, se muestra los simuladores estudiados para el desarrollo del artículo.

Tabla 1. Simuladores para diseño y modelador de PTAR

SIMULADOR	CREADOR	ORIGEN
ASIM	EAWG	Suiza
DESASS	Calagua group-UPV	España
BIOWIN	Envirosim Associates L.d	Canadá
EFOR	DHI Inc.	Dinamarca
GPS-X	Hydromantis Inc.	Canadá
SIMBA	IFACÇK-System Gmbh	Alemania
STOAT	WRc Group	Reino Unido
WEST	Hemmin N.V.	Bélgica
EDAR 1.0	CEIT-Cadagua	España
AQUASIM	EAWAG	Suiza

Fuente: (Sánchez Ramirez et al, 2015)

Teorías relacionadas al tema

a) Tratamiento de aguas residuales

De acuerdo a (MAPAS N° 25, 2015) y otros autores, el tratamiento de aguas residuales implica en una serie de procesos biológicos, químicos y físicos que eliminan los contaminantes presentes en el agua residual que proveniente del uso humano. Los procesos de manejo de aguas residuales se basan en respuestas naturales, como la gravedad para el asentamiento u organismos biológicos naturales; sin embargo, estos componentes están respaldados por equipos mecánicos que requieren mucha energía, lo que conlleva costos elevados de operación, por ello, las normativas vigentes que rigen el diseño, construcción, operación y mantenimiento de plantas que tratan las aguas servidas, disponen evitar el empleo de equipos mecánicos en lo posible, en la figura 2 se muestra una planta con poca intervención mecánica:



Figura 2. PTAR con un sistema de poca intervención mecánica

Fuente: (ANDINA, 2021)

Por otro lado, según (Crites et al, 2006), los sistemas naturales de tratamiento más efectivos de aguas residuales están disponibles en tres categorías principales: acuáticos, terrestres y humedales, y dependen de las respuestas físicas y químicas naturales, así como de los componentes biológicos únicos en cada proceso.

b) Etapas de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo a (SUNASS, 2015), el tratamiento de las aguas servidas, tiene varias etapas a fin de asegurar que el tratamiento sea apropiado para la condición local del cuerpo receptor. Estas se clasifican como: tratamiento preliminar, donde se acondiciona las aguas residuales; tratamiento primario, donde se remueve la materia en suspensión y se produce lodo orgánico; tratamiento secundario, donde se remueve la materia orgánica; tratamiento terciario, donde se busca alcanzar un grado de tratamiento mayor al anterior mediante procesos fisicoquímicos o biológicos; desinfección, esta etapa tiene por objetivo la remoción de microorganismos patógenos con procesos que pueden ser químicos o física con luz ultravioleta; tratamiento de lodos, donde se busca estabilizar los lodos con sustancias volátiles de manera aeróbica, anaeróbica o química. Estas etapas se aprecian en la figura 3 como un esquema:

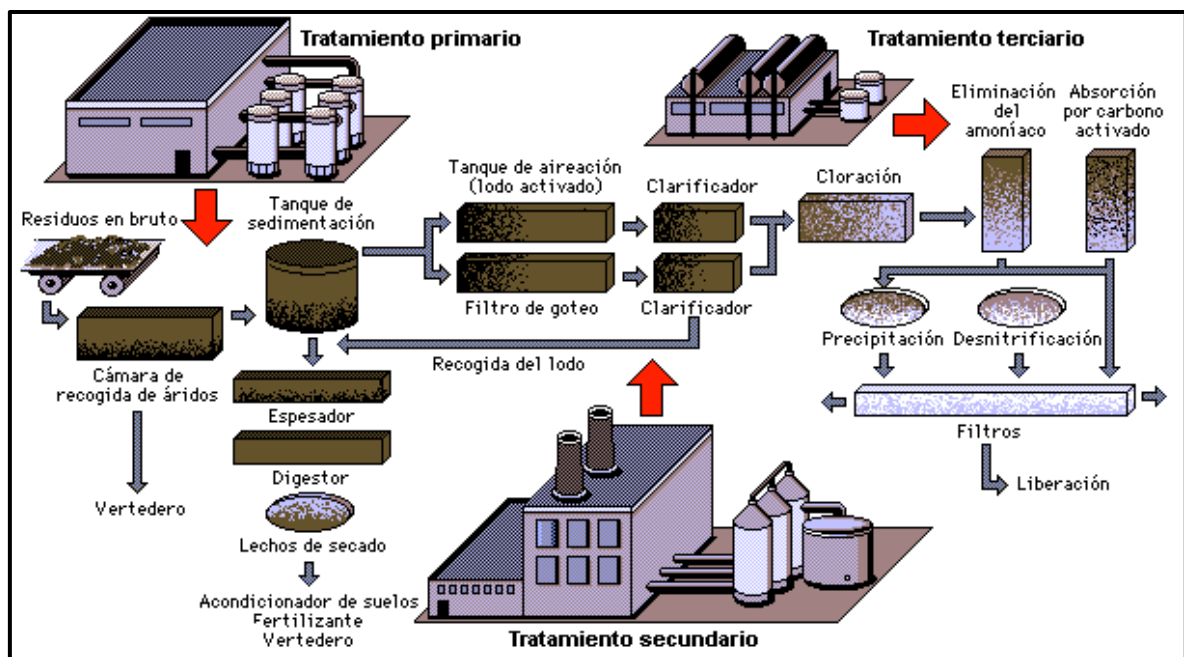


Figura 3. Etapas de sistemas de tratamiento de aguas residuales
Fuente: (GeneratePress, 2021)

c) Procedencia y caracterización de aguas residuales

De acuerdo a (López Vázquez et al, 2017), las aguas servidas provienen de los hogares, instituciones, e industrias y pueden diluirse con el agua de lluvia, aguas subterráneas o aguas superficiales. Los efectos nocivos para la salud y el medio ambiente como pueden ser, la emanación de malos olores, escases de oxígeno disuelto, liberación de contaminantes tóxicos y patógenos, muchas veces, son a

consecuencia de no tratar estas aguas, antes de descargarlas en los cuerpos receptores.

De acuerdo a (Ayala Durán et al, 2008), las aguas servidas presentan propiedades especiales tanto físicas, químicas y biológicas; y se debe tener en cuenta para mejorar su traslado, manipulación, tratamiento y disposición final. Sus características físicas son: la temperatura, color, olor y contenido de Sólidos Suspendedos Totales (SST). Las propiedades químicas son el contenido de sustancias orgánicas, inorgánicas y gases. Durante el diseño de una PTAR y la calidad del efluente, el volumen de materia orgánica se maneja de manera independiente. Las propiedades biológicas son imprescindibles en el control de enfermedades provocadas por organismos patógenos de origen humano, y por la función de las bacterias y otros microorganismos, en la descomposición y estabilización de la materia orgánica.

El (RNE, 2018), establece que, las propiedades de las aguas servidas o residuales en el afluente, deben determinarse mediante pruebas estandarizadas de laboratorio, para realizar el diseño de una PTAR. Asimismo, se debe verificar la calidad del efluente durante la operación de la planta, esto se toma de una muestra de 5 campañas, que deben ejecutarse en diferentes días de la semana.

En las muestras, se debe determinar como mínimo: Demanda bioquímica de oxígeno (DBO) 5 días y 20 °C; Demanda química de oxígeno (DQO); Parásitos (principalmente nematodos intestinales); Sólidos totales y en suspensión incluido el componente volátil; Nitrógeno amoniacal y orgánico; y Sólidos sedimentables.

Como señala (López Vázquez et al, 2017), la típica composición de las aguas servidas domiciliarias en las ciudades se mide en su concentración de contaminantes, y puede ser altas o bajas, el primero representa un caso en el que el consumo de agua y/o infiltración son bajos, y la segunda representa el caso de alto consumo de agua y/o infiltración. Cuanta más agua de lluvia diluye las aguas residuales, menor es su concentración, los valores se muestran en la tabla 2, los cuales están representadas en gr/m^3 .

Tabla 2. Composición típica de aguas residuales municipales

Parámetro	Alto	Medio	Bajo
DQO total	1200	750	500
DQO soluble	480	300	200
DQO suspendida	720	450	300
DBO	560	350	230
AGV (como acetato)	80	30	10
N total	100	60	30
N amoniacal	75	45	20
P total	25	15	6
Ortho-P	15	10	4
SST	600	400	250
SSV	480	320	200

Fuente: (López Vázquez et al, 2017)

De igual manera señala que, en las aguas residuales también se tienen concentraciones de microorganismos en N° de bacterias/100 ml, como se muestra la tabla 3:

Tabla 3. Concentración de microorganismos en aguas residuales

Microorganismo	Alto	Bajo
E coli	$5 * 10^8$	10^6
Coliformes	10^{13}	10^{11}
Cl. Perfringens	$5 * 10^4$	10^3
Streptococcae Fecal	10^8	10^6
Salmonela	300	50
Campylobacter	10^5	$5 * 10^3$
Listeria	10^4	$5 * 10^2$
Staphylococcus aureus	10^5	$5 * 10^3$
Colifagos	$5 * 10^5$	10^4
Giardia	10^3	10^2
Lombrices intestinales	20	5
Enterovirus	10^4	10^3
Rotavirus	100	20

Fuente: (López Vázquez et al, 2017).

En el procedimiento, se tomará en cuenta estos datos para su aplicación durante los cálculos de diseño de componentes de la PTAR.

d) Marco normativo

El marco normativo gestiona los procesos de diseño, construcción, operación y mantenimiento de las PTAR, asimismo, regulan la calidad del efluente tratado.

Ley de recursos hídricos

Esta ley, regula la descarga y reutilización de las aguas residuales tratadas, e sus capítulos VI y VII, de la siguiente manera:

- Regula las condiciones y procedimientos de descarga y reúso de las aguas servidas tratadas

- Establece que, las aguas servidas no se deben descargar ni reutilizar sin tratamiento.
- Define que, es necesario respetar los LMP y los ECA, para la descarga del agua tratada en una PTAR a un cuerpo natural.
- Define que, para reutilización de las aguas servidas tratadas, es necesario respetar los valores de acuerdo el campo de actividad al que se pretende destinar.
- Establece que, el responsable de la gestión del control del vertimiento o reusó autorizado es, la Autoridad Nacional del Agua.
- Establece que, instalar medidores de caudal en una PTAR, es obligatorio.

Por otro lado, el marco regulatorio peruano, para el diseño, construcción y operación de las PTAR, establece los siguientes parámetros y valores:

- En el Decreto Supremo N° 021-2009-VIVIENDA y su reglamento aprobado por el Decreto Supremo N° 003-2011-VIVIENDA, se definen los Valores máximos admisibles (VMA).
- En el Decreto Supremo N.° 003-2010-MINAM, se definen los límites máximos permisibles (LMP) para descargas.
- En el Decreto Supremo N.° 002-2008-MINAM, se definen los estándares de calidad de agua (ECA).

En la tabla 4, se muestra valores de VMA, LMP, ECA y banco mundial a tener en cuenta a la hora de hacer el diseño de las PTAR, estos valores representan la calidad que deben tener las aguas que salen de la planta de tratamiento, teniendo en cuenta la descarga o la disposición final del agua tratada.

Tabla 4. Valores ECAs, LMP, VMA y Banco Mundial.

Parámetros	Und	Valores			
		ECAs Cat. III	LMP	VMA	Banco mundial
Aceites y grasas	mg/l	2	20	100	-
Coliformes fecales	NMP/ 100ml	2000	10000	-	400
DBO 5	mg/l	15	100 (1)	500	50
DQO	mg/l	40	200 (1)	1000	250
PH	-	6.5–8.5	6.5–8.5	6 - 9	6.5–8.5
Sólidos Totales en Suspensión	mg/l	-	150	500	-
Temperatura	°C	-	< 35	<35	-

Nota: (1) Para los efluentes de PTAR con etapas de tratamiento final por lagunas, se refiere a la muestra filtrada.

De acuerdo a (SUNASS, 2015), los LMP son obligatorios para todas las PTAR sin distinción de tamaño, ni de nivel de tratamiento. Los que definen los estándares de la calidad del agua superficial de un cuerpo natural usadas para riego, son los ECA de la categoría 3, esto significa que estos valores también puedan considerarse como los LMP para aguas servidas tratadas.

Los VMA, regulan el vertimiento de aguas no domésticas en las redes de alcantarillado sanitario. En el DS N.º 003-2011-VIVIENDA, los VMA se define como el valor de concentración de elementos o parámetros que caracterizan las aguas residuales no domésticas (físicos y/o químicos), vertidas al sistema alcantarillado de una localidad, que al ser excedidos causa daño inmediato o progresivo en las instalaciones de la PTAR, que impactan negativamente en los procesos de tratamiento.

Normas consideradas para el diseño hidráulico de las PTAR

En Latinoamérica, se ha tenido un gran avance en cuanto al desarrollo del tema de tratamiento de aguas servidas, prueba de ello es la actualización constante de las normativas referentes al tema. A continuación, se describe brevemente las normas consideradas en esta investigación, y se ampliará conforme se vea necesario.

- **Reglamento Nacional de Edificaciones OS. 090 Plantas de Tratamiento de aguas residuales (Perú)**

Esta norma regula, en todas sus etapas, los proyectos de tratamientos de aguas servidas a nivel nacional.

Con respecto al contenido general de esta norma, se pueden señalar los siguientes puntos: cubre las fases de diseño a llevarse a cabo de manera detallada; para seleccionar un proceso eficiente, estima que porcentaje remueve de contaminantes cada unidad; durante el estudio de ingeniería básica, abarca los aspectos más importantes que se deben realizar para diseñar la PTAR; Propone la escorrentía de las aguas residuales y la contribución per cápita de contaminantes; También establece criterios de diseño, parámetros y metodologías para diversas de unidades biológicas. Esto es útil para los proyectos de sistemas de tratamiento de aguas servidas, para localidades donde no exista un estudio al respecto.

- **Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), homologado por la Norma Oficial Mexicana (NOM) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (México)**

En México, este manual lo usan los encargados de diseñar, construir, operar y gestionar los sistemas de agua potable y saneamiento. Está destinado a ser utilizado como guía de los criterios, procedimientos, indicadores, parámetros y casos de éxito, que la Comisión Nacional del Agua (Conagua) considere apropiado, en proyectos de manejo de agua para el país.

Este manual consta de 55 textos, de los cuales, están dirigidos al tratamiento de aguas residuales, los textos que se encuentran entre el MAPAS 25 y el MAPAS 38, que contemplan, la introducción al tema, diseños de unidades de pretratamiento y tratamiento primario, así como el diseño de unidades de tratamiento secundario y terciario, además de propuesta de alternativas tecnológicas avanzadas.

- **Norma Boliviana NB 688-01: Instalaciones Sanitarias, Alcantarillado Sanitario, Pluvial y Tratamiento de Aguas Residuales (Bolivia)**

Lo particular en esta norma son algunos parámetros adicionales que emplea por zonas geográficas. Adicionalmente a esta norma se tiene un guía de diseño de proyectos de saneamiento para poblaciones menores a 10 000 habitantes, publicada en el 2005, donde se detalla la aplicación de la norma.

- **Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) Sección II - Título E. Tratamiento de aguas residuales**

Esta norma consta de 08 títulos, referentes al agua potable y saneamiento. Pero el título E, tiene un contenido específico para el tratamiento de aguas servidas, donde se contemplan parámetros de diseño, operación y mantenimiento de PTAR.

En este trabajo, se han considerado como marco regulatorio para el proceso de diseño de PTAR estas 04 normas, que fueron revisados, comparadas y evaluadas. Esta revisión nos dará una mayor certeza y/o confiabilidad de los diseños que se han de realizar con los procedimientos propuestos. Por supuesto, existen una gran diversidad de normas, pero por motivos de la geografía peruana, se ha tomado la decisión de emplear las normas mencionadas, ya que de alguna manera los países de origen de estas normas tienen cierta similitud geográfica.

III. METODOLOGÍA

3.1. Tipo y diseño de investigación

3.1.1. Método de investigación

Según (Rodríguez Jiménez et al, 2017), la clasificación de los métodos de investigación surge de la consideración momentos en la lógica de la investigación interna, esto permite agruparlos en formas de obtener información y formas de generar conocimientos, además señala que, el razonamiento deductivo es necesario para adquirir conocimientos, y que se pasa de un conocimiento general a otro de un nivel inferior a través de la deducción.

De acuerdo a lo considerado, se establece que, el método de esta investigación es el lógico deductivo, porque se partió de tener afirmaciones de carácter general como las normas a afirmaciones particulares como establecer un proceso de diseño, de lo complejo a lo simple.

3.1.2. Tipo de investigación

Según su finalidad (Cegarra Sánchez, 2004) afirma que, pueden ser tres tipos diferente: básica, aplicada y de desarrollo; la investigación aplicada incluye todas actividades que, destinadas al descubrimiento o aplicación del conocimiento científico, que pueden implementarse en nuevos productos y en procesos disponibles. Basado en ello, esta investigación es aplicada, ya que se ha tomado teorías generales como las normas para establecer un proceso más fácil de diseño.

3.1.3. Nivel de investigación

Como señala (Hernández Sampieri et al, 2014), los estudios exploratorios, se hacen si la finalidad es revisar un tema o problema poco estudiado, es decir, cuando la literatura revisada muestra que solo son pautas e ideas inexploradas con poca relacionan con el problema de estudio; o cuando se desea aprender a cerca de un tema desde una nueva perspectiva. El nivel de estudio que mide, evalúa o reúne datos de conceptos, tendencias, aspectos o partes del fenómeno estudiado, es el descriptivo, en estas investigaciones, se seleccionan preguntas y se mide o recolecta información para cada una de ellas, y describir lo que se estudia. Bajo ese concepto, el nivel de esta investigación tiene un alcance exploratorio y descriptivo, debido a que se realizó una comparativa de criterios de diseño

hidráulico de PTAR, por lo que este estudio propone un proceso de diseño para cada unidad que optimice las plantas en alguna medida.

3.1.4. Diseño de investigación

Teniendo en cuenta a (Hernández Sampieri et al, 2014), el propósito del diseño transversal descriptivo tiene como finalidad estudiar los efectos de las modalidades o niveles de una o más variables en una población. El proceso incluye la búsqueda de diferentes variables a un grupo o muestra, y proporcionar su descripción.

Bajo ese concepto esta investigación tiene un diseño descriptivo, y su esquema es:

$$M \Rightarrow O$$

M: Muestra

O: Observación

3.2. Variables y operacionalización

De acuerdo a (Hernández Sampieri et al, 2014), la definición operacional es el conjunto de procedimientos y actividades que se desarrollan para medir una variable. En ese entender la definición operacional de esta investigación, es buscar un grado de optimización de las PTAR, desarrollando procesos de diseño hidráulico de cada unidad que puede ser parte de la planta.

En cuanto a las variables consideradas y su forma de operar, se muestra la tabla 5, donde se explicada puntualmente los parámetros que tiene esta investigación.

Tabla 5. Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Escala de medición
VI Criterios comparativos	Los criterios comparativos son una herramienta de estudio y exposición de ideas, sumamente útil para disponer de manera lógica y visualmente ordenada de los contenidos de una materia cualquiera (Raffino, 2021).	La comparativa se realiza por componente y tiene por finalidad optimizar las plantas de tratamiento diseñadas con los procedimientos planteados en esta investigación.	Capacidad cognoscitiva	Parámetros de diseño	Nominal
VD Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales	El diseño de la PTAR es uno de los aspectos más desafiantes de la ingeniería, para el que se debe tener en cuenta varios elementos (MAPAS N° 25, 2015).	Cada componente, debe ser diseñado bajo un procedimiento planteado en esta investigación, el cual nace de la comparativa de los criterios de diseño hidráulico realizados.	Sistemas	Medidas de componentes diseñados	Nominal

3.3. Población, muestra, muestreo

Población

Según (Hernández Sampieri et al, 2014), la población, es un conjunto de todas las instancias que cumplen con una especificación particular. La población debe estar organizada claramente en función a su característica o especificación, de ubicación y tiempo. En ese entender la población considerada en esta investigación son todas las normas nacionales e internacionales relacionadas al diseño de las PTAR.

Muestra

Como lo señala (Hernández Sampieri et al, 2014), la muestra es un subgrupo definido por sus características del grupo o conjunto al que llamamos población.

Bajo ese concepto, la muestra para esta investigación es: el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) de Perú; Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) de México; Norma Boliviana NB 688-01. Instalaciones Sanitarias, Alcantarillado Sanitario, Pluvial y Tratamiento de Aguas Residuales de Bolivia; y Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico (RAS) Sección II - Título E. Tratamiento de aguas residuales de Colombia.

Muestreo

Según (Hernández Sampieri et al, 2014), ya sea un tipo de muestreo u otro, lo importante es escoger a los casos adecuados y acceder a ellos, en base al planteamiento del problema. Los estudios no experimentales o descriptivos deben usar muestras probabilísticas si desean que sus resultados se generalicen a la población, pero no es imprescindible.

Por tanto, el muestreo es de manera dirigida no probabilístico, por el alcance del estudio.

3.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

Técnicas e instrumentos de recolección de datos

De acuerdo a (Hernández Sampieri et al, 2014), reunir datos significa aplicar uno o más herramientas de medición para obtener información relevante de las variables de la investigación realizada en la muestra. Además, toda medición o instrumento de recolección de datos debe tener su validez y confiabilidad.

En esta investigación la técnica de recolección de datos fue la revisión de las normas en las cuales se realiza la comparativa. Los instrumentos usados fueron, el empleo de cuadros de comparación de los criterios y parámetros de diseño hidráulico de las PTAR por componente o componente.

Validez y confiabilidad

Por su parte (Contreras, 2015) señala que, la validez y confiabilidad reflejan que la herramienta se adapta a las necesidades del estudio. La validez hace referencia a la capacidad de un instrumento para cuantificar de forma significativa y adecuada el rasgo para cuya medición ha sido diseñado. La confiabilidad se refiere al grado en que la aplicación repetida del instrumento, produce iguales resultados.

En la tabla 6, se muestran los rangos de medición de la validez y confiabilidad más comunes.

Tabla 6. Rangos de validez y confiabilidad

Rango	Validez	Confiabilidad
0.00 a 0.53	Validez nula	Confiabilidad nula
0.54 a 0.59	Validez baja	Confiabilidad baja
0.60 a 0.75	Válida	Confiable
0.66 a 0.71	Muy válida	Muy Confiable
0.72 a 0.99	Excelente validez	Excelente confiable
1.0	Validez perfecta	Confiabilidad perfecta

Fuente: (Contreras, 2015)

De acuerdo al anexo 02, se ha determinado que la validez es excelente y confiabilidad es también excelente.

3.5. Procedimientos

3.5.1. Sistemas de tratamiento de aguas residuales

Como sugiere (GeneratePress, 2021) que, dada la existencia de diferentes sistemas de tratamiento de aguas servidas, se debe considerar varios factores a la hora de elegir el proceso de tratamiento más óptimo, conservando el principio de sostenibilidad económica y técnica, para proteger el medio ambiente en mayor medida.

Como recomienda (Wagner, 2010), para determinar si un sistema es adecuado, el principal parámetro es la calidad del efluente considerado, pero también es importante tener en cuenta siguiente factores: dimensiones de la planta, la

información básica (clima, geológica, geotécnica, hidrológica, topográfica y ubicación), propiedades del agua servida (DBO, DQO, nutrientes, temperatura, etc.), propiedades del suelo y subsuelo, terreno disponible, precio de energía de ser necesario, nivel socioeconómico de la población, y otros.

En la figura 4, se aprecia un esquema de selección del sistema de tratamiento de las aguas servidas.

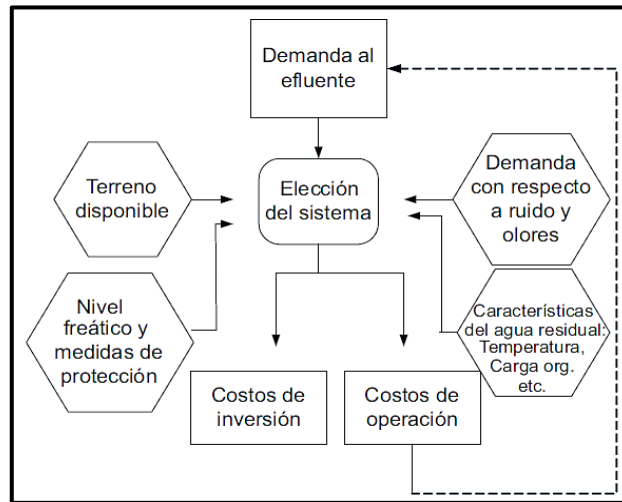


Figura 4. Selección del sistema de tratamiento

Fuente: extraído de (Wagner, 2010)

De acuerdo a (Wagner, 2010), se una gran variedad de sistemas para tratar las aguas servidas, combinando diferentes tecnologías. Según (SUNASS, 2015), la elección de las tecnologías para las PTAR, está relacionado con la calidad de efluente que se requiere alcanzar con el tratamiento de manera directa, esta calidad debe estar dentro de los estándares de la normatividad ambiental vigente.

En la figura 5, se presenta las etapas de tratamiento y las tecnologías que generalmente tiene una PTAR, en un esquema.

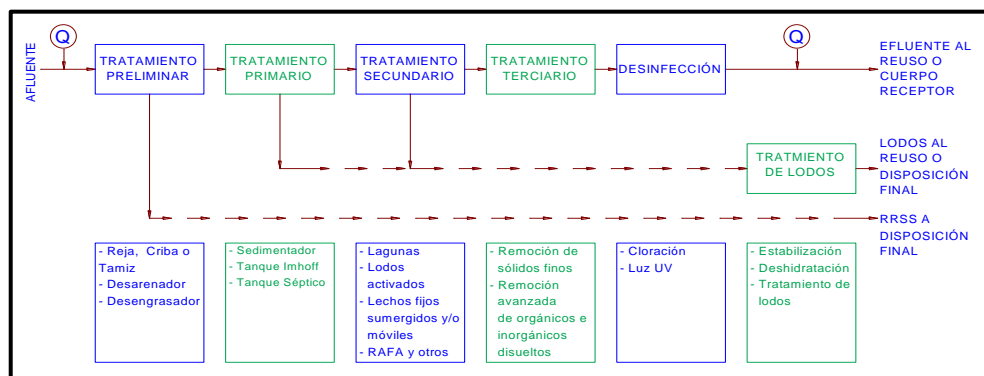


Figura 5. Esquema de PTAR de aguas servidas domésticas

Fuente: extraído de (SUNASS, 2015)

Como describe (Ramalho, 2003), los estándares de calidad de las aguas se basan en uno o dos criterios: regulaciones que limitan las descargas o calidad de las aguas superficiales. Los estándares de calidad de aguas superficiales determinan la calidad de aguas del cuerpo receptor aguas abajo del punto de descarga, mientras que las regulaciones que limitan las descargas, determinan la calidad de las aguas servidas tratadas en su punto de descarga y son más fácil de controlar.

Unidades de tratamiento de aguas residuales

De acuerdo a (Wagner, 2010), los sistemas existentes de tratamiento de aguas servidas son muchas y todos involucran diferentes etapas. En la tabla 7 se muestra una lista de tecnologías o unidades de tratamiento, que pueden ser combinadas entre sí.

Tabla 7. Tecnologías para las PTAR

N°	Tecnología
1	Lagunas anaeróbicas
2	Lagunas facultativas
3	Lagunas de maduración
4	Reactores anaeróbicos como UASB, RALF
5	Tanques Imhoff
6	Fosas sépticas
7	Filtros percoladores
8	Biodiscos
9	Lagunas con aireación
10	Lodos activados
11	Precipitación
12	Lagunas de sedimentación
13	Pantanos artificiales (FWS / VBS wetlands)
14	Lechos de infiltración
15	Desinfección (Cloro, Ozono, UV)
16	Filtros anaeróbicos
17	Filtros aireados
18	Sedimentadores primarios
19	Digestores para lodo
20	Sedimentadores secundarios

Fuente: (Wagner, 2010)

Según (Wagner, 2010), el pretratamiento obligado a considerar puede ser: rejas gruesas (R), tamices (T) o rejas finas y desarenadores (D); que se pueden combinar como: tamices con desarenadores (TD) y rejas gruesas con desarenadores (RD).

Las unidades de precipitación y desinfección combinarse con casi todos los sistemas. En la tabla 8, se muestra posibles combinaciones de tecnologías, donde los números se refieren a las tecnologías de la tabla 7:

Tabla 8. Combinación de tecnologías en diferentes etapas

Pretratamiento	Combo	Tecnologías					Definición
R (D)*	AT	1	2	3			Lagunas anaeróbicas, facultativas y maduración
R (D)*	T	2	3				Lagunas facultativas, maduración
R (D)*	ATDe	1	2	15			Lagunas anaeróbicas y facultativas y desinfección
R (D)*	TDe	2	15				Lagunas facultativas, desinfección)
R (D)*	UT	4	3				Reactores anaeróbicos, lagunas de maduración
RD ó TD	UTDe	4	3	15			Reactores anaeróbicos, lagunas de maduración y desinfección
RD ó TD	UL	4	10		20		Reactores anaeróbicos, lodos activados y sedim.
RD ó TD	ULDe	4	10	15	20		Reactores anaeróbicos, lodos activados, desinfección
RD ó TD	ULM	4	10	3	20		Reactores anaeróbicos, lodos activados, lagunas maduración
RD ó TD	IF	5	7				Tanques Imhoff, filtros percoladores
RD ó TD	IFDe	5	7	15	20(12)		Tanques Imhoff, filtros percoladores, desinfección y sedim.
RD ó TD	IFM	5	7	3	20(12)		Tanques Imhoff, filtros percoladores, lagunas de maduración
RD ó TD	IL	5	10	20			Tanques Imhoff, lodos activados
RD ó TD	ILDe	5	10	15			Tanques Imhoff, lodos activados, desinfección
RD ó TD	ILM	5	10	20	3		Tanques Imhoff, lodos activados, lagunas de maduración
RD ó TD	LA	9					Lagunas con aireación
RD ó TD	LADe	9	15				Lagunas con aireación, desinfección
RD ó TD	ULM	4	10	20	3		Reactores anaeróbicos, lodos activados, laguna de maduración
RD ó TD	ULDe	4	10	20	15		Reactores anaeróbicos, lodos activados, desinfección
RD ó TD	L	10	20				Lodos activados (tanque de aireación, sedimentador secundario)
RD ó TD	LDe	10	15	20			Lodos activados (tanque de aireación, sedimentador secundario), desinfección
RD ó TD	LT	10	3	20			Lodos activados (tanque de aireación, sedimentador secundario), lagunas de maduración pequeñas
RD ó TD	LS	10	20	18	19		Lodos activados (sedimentador primario, tanque de aireación, sedimentador secundario)
RD ó TD	LSDe	10	15	20	18	19	Lodos activados (sedimentador primario, tanque de aireación, sedimentador secundario, desinfección)
RD ó TD	LSM	10	13	20	10	19	Lodos activados (sedimentador primario, tanque de aireación, sedimentador secundario, lagunas de maduración pequeñas)

Fuente: (Wagner, 2010)

Nota: (D)* Uso solamente en caso de existencia de mucha arena.

Eficiencia de depuración de los distintos sistemas de tratamiento

Por supuesto, muchos sistemas pueden satisfacer las mismas demandas, pero, se deben considerar todos los criterios posibles para tomar una decisión a la hora de elegir un sistema. En la tabla 9, se muestran los sistemas capaces de cumplir con diversos niveles de demandas requeridos.

Tabla 9. Sistemas con diferentes niveles de remoción de contaminantes

COMBINACIÓN	DBO <80 mg/l	DQO <250 mg/l	Coliformes <1000 CF/l	Helminfos <1 H/l	NH4-N <10 mg/l	NH4-N <2 mg/l	Remoción N-total > 80 %
AT	x	x	x	x			
T	x	x	x	x			
ATDe	x	x	x	x			
TDe	x	x	x	x			
UT	x	x	x	x			
UTDe	x	x	x	x			
UL	x	x			x	x	
ULDe	x	x	x		x	x	
ULM	x	x		x*	x	x	
IF	x	x			x	x	
IFDe	x	x	x		x	x	
IFM	x	x		x*	x	x	
IL	x	x			x	x	
ILDe	x	x	x		x	x	x
ILM	x	x		x*	x	x	x
LA	x	x		x*			
LADe	x	x	x	x*			
ULM	x	x	x	x*	x	x	
ULDe	x	x	x		x	x	
LS	x	x			x	x	x
LSDe	x	x	x		x	x	x
LSM	x	x		x*	x	x	x

Fuente: (Wagner, 2010).

Nota: x* En caso de tiempos de retención de más de 10 días

Otra manera de definir un sistema de PTAR

Otra manera de definir un sistema de tratamiento, podría ser utilizando el esquema de la figura 6:

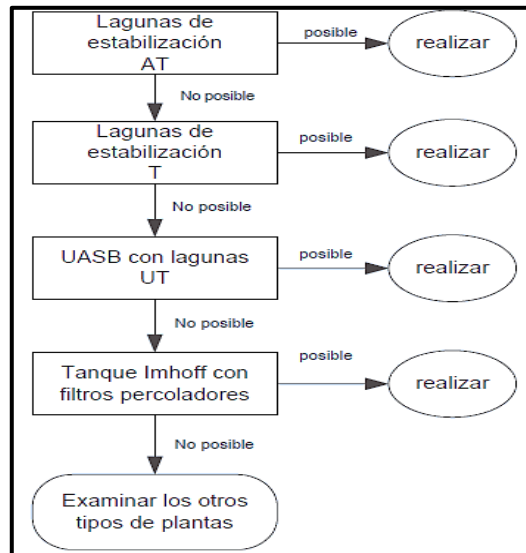


Figura 6. Esquema de elección de sistema
Fuente: extraído de (Wagner, 2010)

3.5.2. Diseño hidráulico de unidades de PTAR

El diseño hidráulico de componentes de PTAR, cubre conceptos teóricos de diseño de las diferentes tecnologías mencionadas. Esto se refiere al cálculo de dimensiones de cada componente (tecnología), es decir en esta parte se definen la geometría de los componentes que pueden estar en una PTAR.

En esta sección, se desarrolla por etapas el diseño hidráulico de unidades de tratamiento o tecnologías, de acuerdo al orden siguiente: análisis y medición de datos básicos, componentes del tratamiento preliminar, componentes del tratamiento primario, componentes del tratamiento secundario, componentes del tratamiento terciario, desinfección y tratamiento de lodos.

A) Análisis y medición de datos básicos

Periodo de diseño

De acuerdo al (RNE, 2018), OS. 100 “Consideraciones básicas de diseño de infraestructura sanitaria”, en localidades o ciudades que requieren una proyección nueva, así como para mejorar y/o ampliar los servicios de saneamiento que ya existen, el periodo de diseño lo definirá el proyectista utilizando un proceso que

asegure su funcionamiento en cada componente de los sistemas y en su conjunto. Para una PTAR, el periodo de diseño dependerá de la vida útil de las unidades instaladas y los recursos financieros, diversos autores y normas recomiendan que se tome en como mínimo 20 años y hasta un máximo de 30 años.

Asimismo, el (RAS Título - A, 2000), establece que, las localidades deben estar clasificados de acuerdo a un nivel de complejidad para así establecer un periodo de diseño para las PTAR y puede estar entre 20 y 30 años, en la tabla 10, se tiene los niveles de complejidad habitacional y su relación con el periodo de diseño.

Tabla 10. Relación de nivel de complejidad, población y periodo de diseño

Nivel de complejidad	Población Actual	Periodo de diseño
Bajo	Hasta 2500	20
Medio	2500 – 12500	25
Medio Alto	12500 – 60000	30
Alto	Mas de 60000	30

Fuente: (RAS Título - A, 2000)

Población de diseño

La población de futura o de diseño, debe calcularse para el periodo de diseño considerado. Existen diversos métodos para realizar este cálculo, dentro de los más empleados se pueden considerar el de crecimiento aritmético, crecimiento geométrico, crecimiento exponencial.

En el Perú, para asentamiento humanos existentes el método de crecimiento aritmético es el más empleado, ya que el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) nos proporciona una razón de crecimiento de acuerdo a los censos que realizan.

El (RNE, 2018), estipula que, para habilitaciones nuevas de viviendas, se debe considerar como mínimo densidad de 6 habitantes/vivienda, como lo estipula el RNE. El método elegido de cálculo, dependerá de las características de la ciudad como factores históricos, socio-económicos y su tendencia de desarrollo.

a) Método de crecimiento aritmético

$$P_f = P_o(1 + r * t) \quad (1)$$

$$r = \frac{\frac{P_i}{P_{i-1}} - 1}{t_i - t_{i-1}} \quad (2)$$

Donde para los tres métodos:

P_f : Población de diseño o población futura (hab.)

P_o : Población del último censo a considerar (hab.)

t : Periodo de diseño (años)

r : Razón de crecimiento que se calcula

P_i : Población en el año i como se muestra en los ejemplos

t_i : Año correspondiente a P_i

b) Método de crecimiento geométrico

$$P_f = P_o(1 + r)^t \quad (3)$$

$$r = \left(\frac{P_i}{P_{i-1}} \right)^{\frac{1}{t_i - t_{i-1}}} - 1 \quad (4)$$

c) Método de crecimiento exponencial

$$P_f = P_o * e^{r*t} \quad (5)$$

$$r = \frac{\ln\left(\frac{P_i}{P_{i-1}}\right)}{t_i - t_{i-1}} \quad (6)$$

Caudales de diseño

Como lo indica (RNE, 2018), para determinar estos caudales, se toma en cuenta la población proyectada y el suministro de agua per cápita, este último debe establecerse sobre la base de un sólido estudio de consumo de agua potable, respaldada por estadísticos validados. En caso de que no exista los estudios de consumo, se considerará para sistemas con conexiones domiciliarias, lo que estipula la norma, en la tabla 11 se puede apreciar el suministro de agua potable según el clima y el área de lotes.

Tabla 11. Dotaciones de agua potable recomendadas

Descripción	Clima	
	Frio	Cálido
Viviendas con áreas > 90 m ²	180 l/hab./d	220 l/hab./d
Viviendas con áreas ≤ 90 m ²	120 l/hab./d	150 l/hab./d

Fuente: Diseño propio y (RNE, 2018).

De igual manera, los cambios en el consumo deben considerarse en base a la demanda promedio, y estos coeficientes deberán establecerse en base al análisis de estadístico validado. De no existir este estudio, la norma establece los valores siguientes:

- Máximo anual de la demanda diaria $K = 1.3$
- Máximo anual de la demanda horaria $K1 = 1.8 - 2.5$

Finalmente, el (RNE, 2018), establece que la contribución de retorno al sistema de alcantarillado, es del 80% del agua potable dotado.

a) Cálculo de caudal promedio, máximo diaria y máximo horario de agua potable

$$Q_{prom} = \frac{DA * P_f}{86400} \quad (7)$$

$$Q_{MD} = k * Q_{prom} \quad (8)$$

$$Q_{MH} = k1 * Q_{prom} \quad (9)$$

Donde:

Q_{prom} : Caudal promedio de agua potable (l/s)

DA : Dotación de agua per cápita potable (l/hab.*d)

P_f : Población de diseño o población futura (hab.)

Q_{MD} : Caudal máximo diario (l/s)

Q_{MH} : Caudal máximo horario (l/s)

De acuerdo a (Ayala Durán, y otros, 2008), y otros autores se puede determinar “k” y “k1” mediante fórmulas propuestas por algunos autores. De estas fórmulas se puede deducir que: a mayor población de diseño menor es el valor de estos factores.

Por lo que para el caso determinar el valor k1 para poblaciones de 1,000 hasta 100,000 habitantes, se tomará a consideración la siguiente expresión:

$$k1 = -7 * 10^{-6} * p_f + 2.507 \quad (10)$$

De tener poblaciones menores a 1,000 habitantes, el valor de k1 será 1.8.

Para poblaciones mayores a 100,000 habitantes, el valor de k1 será 2.5.

b) Cálculo de caudal promedio, caudal máximo diario y caudal máximo horario de aguas residuales (alcantarillado)

A partir de las ecuaciones (7), (8) y (9), se determina estos valores:

$$Q'_{prom} = 0.8 * Q_{prom} \quad (11)$$

$$Q'_{MD} = 0.8 * Q_{MD} \quad (12)$$

$$Q'_{MH} = 0.8 * Q_{MH} \quad (13)$$

Dónde:

Q'_{prom} : Caudal promedio de aguas residuales (l/s)

Q'_{MD} : Caudal máximo diario de aguas residuales (l/s)

Q'_{MH} : Caudal máximo horario de aguas residuales (l/s)

Características del afluente

Las características del afluente deben definirse mediante un muestreo bajo parámetros de métodos estandarizados, como está descrito en el marco teórico y como lo señala el (RNE, 2018).

Para localidades que no tienen un sistema de alcantarillado o no tienen con un estudio de las aguas servidas, la definición de las características del afluente debe efectuarse considerando los parámetros más importantes, en base a las contribuciones per cápita de contaminantes, que se señalan en la tabla 12.

Tabla 12. Aportes per cápita de contaminantes, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
DBO 5 días, 20 °C	g/(hab.*d)	50	50	54	54
DQO	g/(hab.*d)	-	-	110	71
SST	g/(hab.*d)	90	50	52	54
NH3-N como N	g/(hab.*d)	8	8.4	8	-
N Kjeldahl total como N	g/(hab.*d)	12	12	-	-
Coliformes fecales	N°bac./ (hab.*d)	$2 * 10^{11}$	$2 * 10^{11}$	-	$2 * 10^{11}$
Salmonella Sp	N°bac./ (hab.*d)	$1 * 10^8$	$1 * 10^8$	-	$1 * 10^8$
Nematodos intestinales	N°bac./ (hab.*d)	$4 * 10^5$	$4 * 10^5$	-	$4 * 10^5$

Fuente: Diseño propio

Para el diseño de una PTAR, es necesario conocer principalmente la masa o carga y su concentración de contaminantes (DBO, DQO, nitrógeno, sólidos en suspensión y coliformes fecales).

De acuerdo a (Hernandez, 1992), para definir la concentración de DQO se debe considerar que, si la relación DQO/DBO es menor a 2.5 es un compuesto biodegradable, donde se puede usar sistemas biológicos; pero si la relación está entre 2.5 y 5 existe la necesidad de empleo de lechos bacterianos. Por otro lado (Cisterna Osorio et al, 2012) señala que, la relación QDO/DBO de las aguas servidas domésticas y/o municipales tiene una relación directa con la cantidad de habitantes, de manera que, si existe mayor población, la relación es mayor.

a) Cálculo de carga orgánica DBO

$$C_{DBO} = \frac{P_f * AP_{DBO}}{1000} \quad (14)$$

Donde:

C_{DBO} : Carga orgánica DBO (kg/d)

AP_{DBO} : Aporte per cápita de DBO (g/ (hab.*d))

b) Cálculo de carga de DQO

$$C_{DQO} = \frac{P_f * AP_{DQO}}{1000} \quad (15)$$

Donde:

C_{DQO} : Carga de DQO (kg/d)

AP_{DQO} : Aporte per cápita de DQO (g/(h*d))

c) Cálculo de carga de sólidos en suspensión y totales

$$C_{SST} = \frac{P_f * AP_{SS}}{1000} \quad (16)$$

Donde:

C_{SST} : Carga de sólidos en suspensión (kg/d)

AP_{SST} : Aporte per cápita de sólidos en suspensión y totales (g/(h*d))

d) Cálculo de carga de coliformes fecales

$$C_{CF} = P_f * AP_{CF} \quad (17)$$

Donde:

C_{CF} : Carga de coliformes fecales

AP_{CF} : Aporte per cápita de coliformes fecales

e) Cálculo de concentración de contaminantes

$$S_a = \frac{Carga}{Q'_{prom}} \quad (18)$$

Donde:

S_a : Concentración de contaminantes de afluente (DBO, DQO, SS y CF)

Carga: Carga de contaminantes (DBO, DQO, SS y CF)

B) Unidades de tratamiento preliminar

Canal de ingreso y cámara de rejillas de limpieza manual

Según (Ramalho, 2003), el tamizado se utiliza para reducir sólidos de varios tamaños, y la abertura de las rejillas depende de los mismos. Su limpieza puede ser manual o mecánico y los productos que se recogen se destruyen por incineración.

Por su parte el (RNE, 2018), señala que, a menos que la cantidad de material a tamizar sea adecuada para una limpieza mecánica, la cámara de rejillas debe diseñarse para limpieza manual y señala que deben considerarse dos canales cada uno con sus rejillas, dimensionados para el caudal máximo horario. Al respecto el (MAPAS N° 26, 2015), establece que, estas rejillas requieren poco o ningún mantenimiento, solo deben limpiarse con regularidad para evitar obstrucciones que pueden causar fluctuaciones bruscas de flujo y reducir su eficiencia de captura de sólidos.

Según las normas consideradas para los procesos de diseño, se deben tomar los criterios mostrados en la tabla 13:

Tabla 13. Criterios de diseño de rejillas de limpieza manual, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Tipo de barra	-	Rectangular	-	-	-
Espaciamiento entre barras	mm	20 – 50	15 - 50	25 – 51	10 – 20
Espesor de barra	mm	5 – 15	-	6 – 16	-
Ancho de barra	mm	30 – 75	-	-	-
Velocidad de aproximación	m/s	0.3 – 0.6	0.3 – 0.6	0.3 – 0.6	<0.4
Velocidad entre barras limpias	m/s	0.6 – 0.75	-	-	0.55 – 1.2
Angulo de inclinación de barras	Grados	45 – 60	-	30 - 60	-
Profundidad útil del canal	cm	-	-	30	-

Fuente: Diseño propio

Adicionalmente el (RNE, 2018), muestra una tabla para estimar la cantidad de material en litros por metro cúbico de agua residual, mostrados en la tabla 14.

Tabla 14. Cantidad de material cribado

Abertura (mm)	Cantidad de material (l/m3)
20	0.038
25	0.023
35	0.012
40	0.009

Fuente: (RNE, 2018)

Además, el (RNE, 2018) estipula que, las pérdidas de carga en el paso del flujo por la reja, deben calcularse para rejas limpias y con obstrucción en un 50 %. Muchos autores consideran que, la pérdida de carga no debe ser mayor a 15 cm. Por su parte el (RAS Título - E, 2000), define como realizar la pérdida de carga considerando la forma de la barra empleada en la reja de la siguiente manera:

$$K = \beta * \left(\frac{S}{a}\right)^{1.33} * \sin \theta \quad (19)$$

$$h_L = K * h_v \quad (20)$$

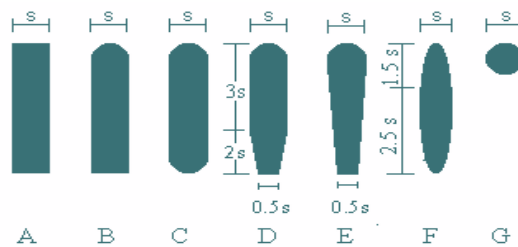
Donde β , depende de la forma de barras en la rejilla

S : Ancho máximo de la barra (m)

a : Espaciamiento mínimo entre barras (m)

θ : Angulo de inclinación de la rejilla (°)

Forma	A	B	C	D	E	F	G
β	2.42	1.83	1.67	1.035	0.92	0.76	1.79



En la figura 7, se puede apreciar como se ve una cámara de rejas de limpieza manual.



Figura 7. Vista de una cámara de rejillas

A continuación, se detallará el proceso de diseño, tomando en cuenta los diferentes criterios proporcionados por las normas:

a) Cálculo de diámetro del emisor

Para definir el ancho del canal de ingreso, es necesario tener como referencia el diámetro de la tubería del emisor del alcantarillado.

Por continuidad se tiene y partiendo de la ecuación (13), se tiene:

$$A_t = \frac{Q'_{MH}}{V_t} \quad (21)$$

$$A_t = 0.75 * \frac{D^2 * \pi}{4} \quad (22)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A_t}{0.75 * \pi}} \quad (23)$$

Dónde:

A_t : Área de tubería de emisor lleno al 75% estipulado en el RNE (m²)

Q'_{MH} : Caudal máximo horario de desagüe (m³/s)

V_t : Velocidad en tubería (0.6 m/s mínimo para evitar sedimentos)

D : Diámetro de tubería de emisor (diámetro comercial en m)

b) Dimensionamiento del canal de aproximación

$$A_c = \frac{Q'_{MH}}{V_c} \quad (24)$$

$$Y = \frac{A_c}{b} \quad (25)$$

$$h = Y + 0.15 \text{ m} \quad (26)$$

Dónde:

A_c : Área útil del canal de aproximación (m²)

V_c : Velocidad de flujo en el canal (0.45 m/s recomendado por el RNE)

Y : Tirante de agua (m)

b : Ancho de canal igual al diámetro calculado del emisor "D" (m)

h : Altura total del canal de aproximación (m)

c) Cálculo de longitud de barras

$$L_b = \frac{h}{\text{sen } \theta} \quad (27)$$

Dónde:

L_b : Longitud de barras de reja (m)

θ : Inclinación de reja respecto a la horizontal (°)

d) Cálculo de número de espacios y barras

$$N_e = \frac{b - a}{a + e} \quad (28)$$

$$N_b = N_e - 1 \quad (29)$$

Dónde:

N_e : Número de espacios (u)

N_b : Número de barras (u)

b : Ancho del canal (mm)

a : Espaciamiento entre barras = $3 \cdot e + 5$ (mm)

e : Espesor de barra (mm)

e) Cálculo de velocidad de aproximación

$$V_a = \frac{Q'_{MH}}{(b - e) * Y} \quad (30)$$

Dónde:

V_a : Velocidad de aproximación (m/s)

f) Cálculo de velocidad a través de la reja

$$A_r = N_b * e * Y \quad (31)$$

$$V_r = \frac{Q'_{MH}}{A_c - A_r} \quad (32)$$

Dónde:

A_r : Área ocupada por rejas (m²)

V_r : Velocidad a través de rejas, esta debe resultar (0.6 – 0.75 m/s)

g) Cálculo de pérdidas de carga en rejas rectangulares

$$h_L = \frac{1}{0.7} * \left(\frac{V_r^2 - V_a^2}{2 * g} \right) \quad (33)$$

$$h_{L1} = \frac{1}{0.7} * \left(\frac{(2V_r)^2 - V_a^2}{2 * g} \right) \quad (34)$$

Dónde:

h_L : Pérdida de carga en criba limpia (m)

h_{L1} : Pérdida de carga en criba obstruida al 50% (≤ 0.15 m)

g : Gravedad (m/s²)

h) Cálculo de pérdidas de carga en rejas con otras formas

$$h_L = \beta * \left(\frac{e}{a} \right)^{4/3} * h_v * \text{sen } \theta \quad (35)$$

$$h_v = \frac{V_a^2}{2 * g} \quad (36)$$

Dónde: β : Factor de forma de barra en rejas

h_v : Altura o energía de velocidad de aproximación (m)

i) Cálculo de pendiente del canal antes y después de rejas

$$Rh = \frac{A_c}{b + 2 * Y} \quad (37)$$

$$S = \left(\frac{V_c * n}{Rh^{2/3}} \right)^2 \quad (38)$$

Dónde:

Rh : Radio hidráulico del canal (m)

n : Factor de rugosidad del canal (para canal de concreto 0.013)

j) Cálculo de longitud de plataforma de escurrimiento

$$L_p = 2 * b \quad (39)$$

Dónde:

L_p : Largo de plataforma de escurrimiento (m)

Desarenadores de flujo horizontal

De acuerdo a (RNE, 2018) y (OPS y CEPIS 158, 2005), son unidades de pretratamiento que contienen cámaras diseñadas para separar del agua cruda la arena y partículas gruesas suspendidas, refiriéndose normalmente a las partículas superiores a 0.2 mm, el desarenado tiene la finalidad de cuidar los equipos mecánicos, también se emplean en las siguientes etapas de tratamiento para evitar depósitos en canales y tuberías. Asimismo, el (MAPAS N° 26, 2015), menciona tres tipos de desarenadores que son: de flujo horizontal que son los más usados, aireado y de tipo vórtice; en estas unidades la partícula más ligera de arena llegará al fondo del canal antes de que el flujo llegue al otro extremo.

Además, las normas colombiana, boliviana y peruana recomiendan que estas unidades se diseñen de manera preferente de limpieza manual, salvo sean para instalaciones grandes donde se justifiquen el empleo de equipos mecánicos.

Los criterios de diseño para estas unidades se detallan en la tabla 15:

Tabla 15. Criterios de diseño de desarenadores, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Número de cámaras	und	2	2	2	2
Velocidad de flujo en cámaras	m/s	0.24–0.36	0.2 – 0.4	0.15–0.4	0.2 – 0.4
Tiempo de retención hidráulico	seg.	-	20 - 180	15 – 90	30 – 120
Tasa de aplicación	m ³ /m ² /h	45 – 70	30 – 65	-	38–52 (a)
Tipo de limpieza	-	Manual	Manual para Q<50l/s	Manual para Q<50l/s	Manual para Q<50l/s
Frecuencia mínima de limpieza	días	7	-	-	15
Profundidad (tirante + cámara)	m	-	2 – 5	0.6 – 1.5	-
Largo de desarenador	m	-	-	3 – 25	-
Relación de largo/profundidad	-	-	1 - 5	-	-
Relación de largo/tirante agua	-	> 25	-	-	-
Relación de largo/ancho	-	-	2.5 - 5	-	7 – 15
Estructura de control de caudal	Tipo	Parshall o Sutro	Sutro u otro	Parshall o Sutro	-
Profundidad de cámara arena	m	0.15 -0.25	-	0.15 - 0.25	-

Fuente: Diseño propio

Nota: (a) Cargas hidráulica típicas que varían con la temperatura entre 5 – 20 °C

Todos los parámetros mencionados en la tabla anterior, son para retener partículas con diámetro mayor a 0.2 mm y con una densidad de 2.65 gr/cm³, tal como coinciden las normas consultadas, y en cuanto al caudal de diseño en todos los casos se emplea el caudal máximo horario.

En cuanto a la geometría del desarenador (MAPAS N° 26, 2015), recomienda incrementar al largo teórico calculado entre un 25% y 50%, esto con la finalidad de disipar por completo turbulencia al ingreso, los desarenadores de sección rectangular por lo general tienen una profundidad total de 1 a 1.5 veces el ancho, y la altura de la cámara de arenas suele estar entre 15 a 30 cm.

La velocidad de asentamiento se de acuerdo a (MAPAS N° 26, 2015), se puede considerar 25 mm/s. Sin embargo, las otras normas consultadas, a partir de las tasas de aplicación nos sugieren velocidades menores. Con la finalidad de tener mejor comprensión al respecto en (OPS y CEPIS 158, 2005).

Además, todas las normas coinciden en que, el diseño de los desarenadores de flujo horizontal, pueden ser de 02 tipos dependiendo del sistema de medición de caudal que lo controla: controlado por un aforador Parshall (garganta) y controlado por un vertedero Sutro (proporcional).

En la tabla 16, se aprecia las diferentes velocidades de sedimentación de acuerdo al diámetro de las partículas.

Tabla 16. Relación entre diámetro de partículas y velocidad de sedimentación

Material	Ø de partículas (cm)	Nº de Reynolds	Vs (cm/s)	Régimen	Ley Aplicable
Grava	>1	>10000	100	Turbulento	$V_s = 1.82 \sqrt{dg \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)}$ Newton
Arena Gruesa	0.100	1000	10.0	Transición	$V_s = 0.22 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g \right)^{2/3} \left[\frac{d}{(\eta/\rho)^{1/3}} \right]$ Allen
	0.080	600	8.3		
	0.060	180	6.4		
	0.050	27	5.3		
	0.040	17	4.2		
	0.030	10	3.2		
	0.020	4	2.1		
Arena Fina	0.015	2	1.5	Laminar	$V_s = \frac{1}{18} g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\eta} \right) d^2$ Stokes
	0.010	0.8	0.8		
	0.008	0.5	0.6		
	0.006	0.24	0.4		
	0.005	1.0	0.3		
	0.004	1.0	0.2		
	0.003	1.0	0.13		
0.002	1.0	0.06			
0.001	1.0	0.015			

Fuente: (OPS y CEPIS 158, 2005)

Nota : " ρ_s " y " ρ " son el peso específico de la partícula y el líquido (gr/cm³), " g " gravedad (cm/s²), " d " diámetro de la partícula (cm) y " η " viscosidad cinemática (cm²/s).

Los procedimientos de diseño, se detallan a continuación:

Desarenador controlado con canal Parshall

a) Cálculo de velocidad de sedimentación

Aplicamos directamente ley de Allen, para partículas con diámetros mayores a 0.2mm y peso específico de 2.65 gr/cm³:

$$V's = 0.22 \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g \right)^{2/3} \left[\frac{d}{(\eta/\rho)^{1/3}} \right] \quad (40)$$

De acuerdo a (OPS y CEPIS 158, 2005), es necesario considerar lo siguiente:

$$Re = \frac{V's * d}{\eta} \quad (41)$$

$$Ca = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0.34 \quad (42)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{4}{3} * \frac{g}{Ca} (\rho_s - 1) * d} \quad (43)$$

Dónde: $V's$: Velocidad de sedimentación en flujo estático (cm/s)

Re : Número de Reynolds

Ca : Coeficiente de arrastre

V_s : Velocidad de sedimentación (cm/s)

b) Determinación de ancho de garganta de aforador Parshall

Debido a que está estandarizado las dimensiones de los aforadores Parshall, se recurrirá a las tablas 17 y 18; y a la figura 8. Tomando en cuenta que el caudal máximo horario sea menor a la capacidad máxima del canal.

Tabla 17. Fórmulas de caudales en canales Parshall

Ancho garganta (W)		Ecuación Q(m ³ /s) y Ha(m)	Capacidad (l/s)
En (cm)	En (")		
2.5	1"	$Q = 0.055H_a^{1.5}$	0.3 – 5
5.0	2"	$Q = 0.110H_a^{1.5}$	0.6 – 13
7.6	3"	$Q = 0.176H_a^{1.547}$	0.8 – 55
15.2	6"	$Q = 0.381H_a^{1.58}$	1.5 – 110
22.9	9"	$Q = 0.535H_a^{1.53}$	2.5 – 250
30.5	12"	$Q = 0.690H_a^{1.522}$	3.1 – 455
45.7	18"	$Q = 1.054H_a^{1.538}$	4.3 – 700
61.0	24"	$Q = 1.426H_a^{1.55}$	12 – 950
91.4	36"	$Q = 2.182H_a^{1.566}$	17 – 1400
121.9	48"	$Q = 2.935H_a^{1.578}$	37 – 1900
152.4	60"	$Q = 3.728H_a^{1.587}$	60 – 2400
182.8	72"	$Q = 4.515H_a^{1.595}$	70 – 2900
213.4	84"	$Q = 5.306H_a^{1.601}$	115 – 3450
243.8	96"	$Q = 6.101H_a^{1.606}$	130 – 3950
305.0	120"	$Q = 7.463H_a^{1.6}$	250 – 5660

Fuente: (MAPAS N° 26, 2015)

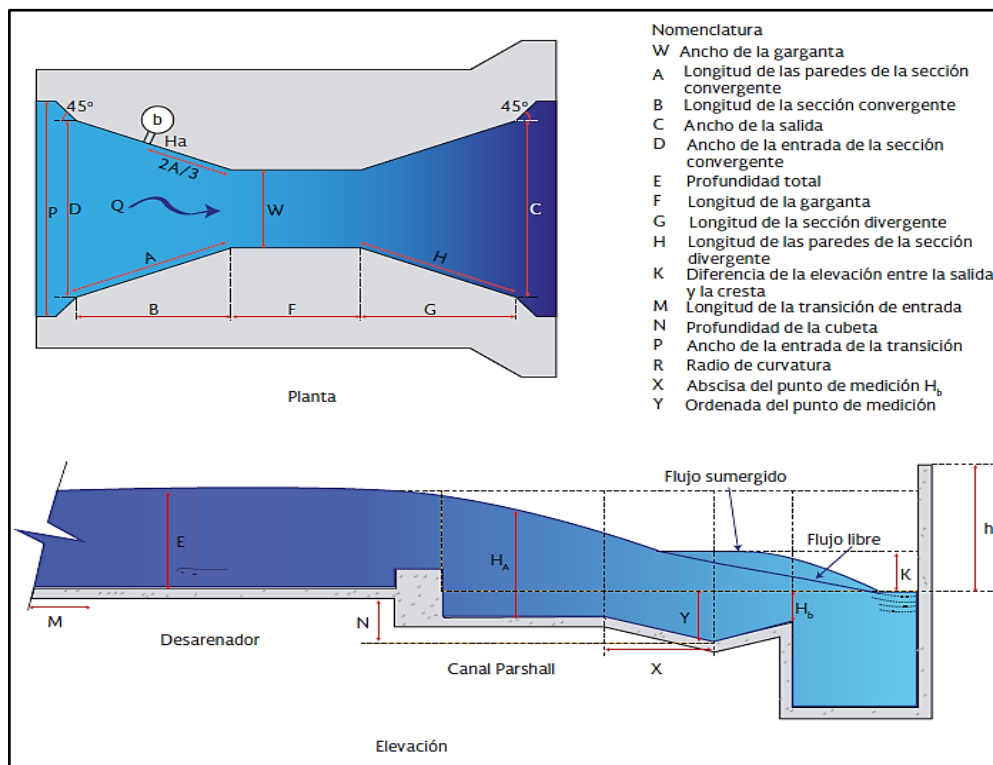


Figura 8. Configuración de la Canaleta Parshall

Fuente: (MAPAS N° 26, 2015)

Tabla 18. Dimensiones de canaleta Parshall, de acuerdo a la figura 8

W (cm)	A (cm)	B (cm)	C (cm)	D (cm)	E (cm)	F (cm)	G (cm)	K (cm)	N (cm)	R (cm)	M (cm)	p (cm)	x (cm)	y (cm)
2.5	36.3	35.6	9.3	16.8	22.9	7.6	20.3	1.9	2.9	-	-	50.0	0.8	1.3
5.0	41.4	40.6	13.5	21.4	35.6	11.4	25.4	2.2	4.3	-	-	70.0	1.6	2.5
7.6	46.6	45.7	17.8	25.9	38.1	15.2	30.5	2.5	5.7	40.6	30.5	76.8	2.5	3.8
15.2	62.1	61.0	39.4	40.3	45.7	30.5	61.0	7.6	11.4	40.6	30.5	90.2	5.1	7.6
22.9	88.0	86.4	38.0	57.5	61.0	30.5	45.7	7.6	11.4	40.6	30.5	108.0	5.1	7.6
30.5	137.2	134.4	61.0	84.5	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	50.8	38.1	149.2	5.1	7.6
45.7	144.9	142.0	76.2	102.6	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	50.8	38.1	167.6	5.1	7.6
61.0	152.5	149.6	91.5	120.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	50.8	38.1	185.4	5.1	7.6
91.4	167.7	164.5	122.0	157.2	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	61.0	38.1	222.3	5.1	7.6
121.9	183.0	179.5	152.5	193.8	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	61.0	45.7	271.1	5.1	7.6
152.4	198.3	194.1	183.0	230.3	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	61.0	45.7	308.0	5.1	7.6
182.8	213.5	209.0	213.5	266.7	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	61.0	45.7	344.2	5.1	7.6
213.4	228.8	224.0	244.0	303.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	61.0	45.7	381.0	5.1	7.6
243.8	244.0	274.5	274.5	340.0	91.5	61.0	91.5	7.6	22.9	61.0	45.7	417.2	5.1	7.6
305.0	274.5	366.0	366.0	475.9	122.0	91.5	183.0	15.3	34.3	-	-	-	30.5	22.9

Fuente: (MAPAS N° 26, 2015)

c) Cálculo de tirante de agua en el punto de medición para caudales máximo horario, medio y mínimo ($Q'_{prom}/2$)

De la ecuación de caudal del canal Parshall, se tiene lo siguiente:

$$Q = b * H_a^c \quad (44)$$

$$H_a = \left(\frac{Q'(m^3/s)}{b} \right)^{1/c} \quad (45)$$

Dónde:

H_a : Tirante de agua en el punto de medición (m).

b : Valor obtenido de la tabla 16.

d) Cálculo de velocidad en el punto de medición para caudales máximo horario, medio y mínimo ($Q'_{prom}/2$)

A partir de la Tabla 16, se tiene lo siguiente:

$$W' = \frac{2D + W}{3} \quad (46)$$

$$A = H_a * W' \quad (47)$$

$$V_2 = \frac{Q'(m^3/s)}{H_a * W'} \quad (48)$$

Dónde:

A : Área del canal en el punto de medición (m^2)

W' : Ancho de canal en el punto de medición (m)

V_2 : Velocidad de flujo en el punto de medición (m/s)

e) Cálculo de tirante en el canal del desarenador para caudales máximo horario, medio y mínimo ($Q'_{prom}/2$)

A partir de la ecuación de Bernoulli, entre los niveles de agua en el final del desarenador y el punto de medición se tiene:

$$\frac{V_1^2}{2g} + h = \frac{V_2^2}{2g} + H_a + h_L \quad (49)$$

$$h_L = 0.1 \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (50)$$

$$h = 0.9 \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \right) + H_a \quad (51)$$

$$h_d = h + 0.15 \quad (52)$$

Dónde:

h : Tirante hidráulico en el canal desarenador (m)

h_L : Altura del agua sobre la canaleta (m)

V_1 : Velocidad en el canal desarenador recomendado (0.30 m/s)

h_d : Altura total del desarenador (m)

f) Cálculo de ancho del techo en la parte superior de una sección parabólica

$$T = \frac{3}{2} * \frac{Q' (m^3/s)}{V_1 * h} \quad (53)$$

Dónde:

T : Ancho del techo de una sección parabólica (m)

Obtenidos los valores de h y T , se traza una curva como la de la Figura 9, donde se define un ancho de canal de fondo.

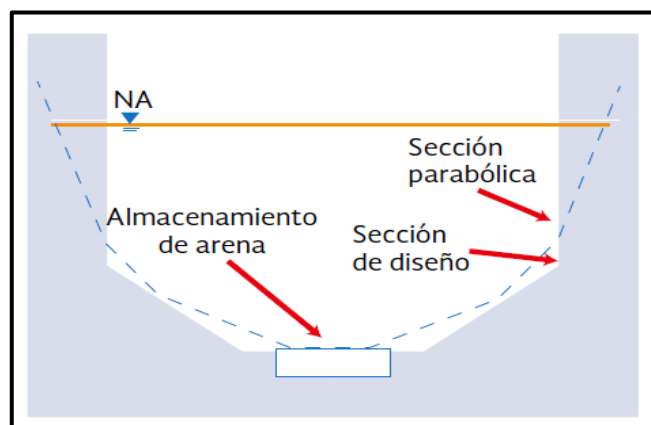


Figura 9. Sección del Desarenador controlada por Parshall
Fuente: (MAPAS N° 26, 2015)

g) Cálculo de tiempo de sedimentación y longitud del desarenador

$$t = \frac{h}{V_s} \quad (54)$$

$$L = t * V_1 \quad (55)$$

$$L_T = L + k * L \quad (56)$$

Dónde:

t : Tiempo de sedimentación (s)

h : Tirante máximo de agua en el canal desarenador (m)

L : Longitud teórica del desarenador (m)

L_t : Longitud total del desarenador (m)

k : Porcentaje para longitud adicional (25% – 50%)

h) Cálculo de volumen de arena

$$V_{ar} = \Delta_{ar} * Q'_{prom} \quad (57)$$

Dónde:

V_{ar} : Volumen de arena (m³/d)

Δ_{ar} : Concentración de arena en agua (m³/1000 m³)

Desarenador controlado con vertedero sutro

El proceso de diseño hidráulico de un desarenador controlado por un vertedero Sutró, se realiza de la siguiente manera:

a) Cálculo de área superficial y área transversal del desarenador

De acuerdo a la (DIGESBA - NB 688, 2001), se tiene que:

$$A_s = \frac{Q'_{MH} * k}{C_s} \quad (58)$$

$$C_s = \frac{22.5 * T + 808.5}{24} \quad (59)$$

$$A_t = \frac{Q'_{MH}}{V_h} \quad (60)$$

Dónde:

A_s : Área superficial del desarenador teórico (m²)

C_s : Carga hidráulica superficial (m³/m²/h)

T : Temperatura del agua residual del mes más frío (°C)

k : Factor de comportamiento depende de la relación largo (L)/ancho (B)

Si: $L/B > 15$ $k=1.2$; $7 < L/B < 15$ $k=1.8$ y $L/B < 7$ $k=2.3$

A_t : Área transversal del desarenador (m^2)

V_h : Velocidad horizontal (recomendado $< 0.30m/s$)

b) Cálculo de dimensiones del desarenador

Tomando la relación lago/acho ($r= 7 - 15$), se tiene:

$$L = \sqrt{r * A_s} \quad (61)$$

$$B = \frac{L}{r} \quad y \quad h = \frac{A_t}{b} \quad (62)$$

Dónde:

L : Largo del desarenador (m)

B : Ancho del desarenado (m)

h : Tirante de agua máximo (m)

c) Dimensionamiento del vertedero tipo Sutro (proporcional)

De acuerdo a (OPS y CEPIS 158, 2005), la ecuación del caudal que pasa por el vertedero es:

$$Q = 2.74\sqrt{ab} \left(H - \frac{a}{3} \right) \quad (63)$$

La forma del vertedero es el de la figura 10, cuya ecuación se encuentra debajo de la figura.

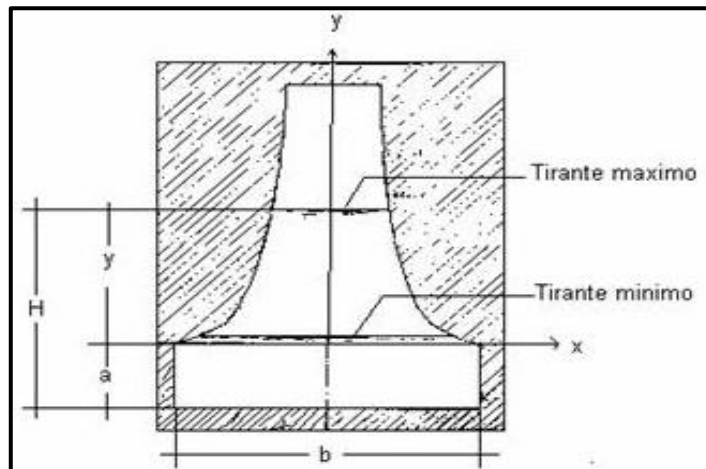


Figura 10. Forma del Vertedero Sutro
Fuente: (OPS y CEPIS 158, 2005)

$$\frac{x}{b} = 1 - \frac{2}{\pi} \arctg \left(\sqrt{\frac{y}{a}} \right) \quad (64)$$

Se recomienda que, el ancho máximo del vertedero sea el 40% del ancho del desarenador. Y que el valor de "a" sea mínimo 4 cm.

$$b = 0.4 * B \quad y \quad a > 4 \text{ cm}$$

d) Cálculo de pendiente del canal del desarenador

$$Rh = \frac{A_t}{B + 2 * h} \quad (65)$$

$$S = \left(\frac{V_h * n}{Rh^{2/3}} \right)^2 \quad (66)$$

Dónde:

S : Pendiente de canal (%)

Rh : Radio hidráulico del canal (m)

n : Factor de rugosidad del canal (para canal de concreto 0.013)

Trampa de grasas o desengrasador

Según (RAS Titulo - E, 2000), son pequeños tanques donde la grasa sube a la superficie por que las grasas y los aceites tienen una densidad menor a la del agua, esta unidad no tiene partes mecánicas y se diseñan de manera similar a un tanque séptico y deben colocarse antes de las unidades de tratamiento primario u otra unidad que requiera este dispositivo.

Estos tanques propician una estadía tranquila del agua servida durante un período conveniente para que las partículas a ser removidas puedan atravesar el trayecto entre el fondo y la superficie (MAPAS N° 38, 2015).

De acuerdo a las normas consultadas, se deben tener a consideración como criterios de diseño los valores de acuerdo a la tabla 19:

Tabla 19. Parámetros de diseño de trampas de grasa, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Tiempo de retención hidráulica	min	-	3 – 5 (*)	3 – 5 (*)	-
Velocidad de ascenso de grasas	mm/s	-	4	4	-
Área superficial requerida	m ² /(l/s)	-	0.25	0.25	-
Tasa de aplicación	l/(s*m ²)	-	4	4	-
Relación de largo/ancho	-	-	1.4 – 1.8	1.8	-

Fuente : Diseño propio

Nota : (*) Los tiempos de retención varían de acuerdo al caudal de entrada (si 2-19 l/s le corresponde entre 3 y 4 min, pero si es 20 o más l/s se considera 5 min).

Además, según (Ayala Durán et al, 2008) las normas suizas contemplan valores de las densidades de aceites o grasas comunes, y un método para de realizar el

dimensionamiento del área superficial de los separadores de grasas. Como se ve en la tabla 20.

Tabla 20. Normas suizas para dimensionamiento de separadores de grasas

Densidad de grasas (kg/dm ³)	Velocidad de ascenso (m/h)	Área superficial de separador de grasas para Q=1L/s en (m ³)
0.75	22.50	0.16
0.80	18.00	0.20
0.85	13.50	0.27
0.90	9.00	0.40

Fuente: (Ayala Durán, y otros, 2008)

En la figura 11, se muestra un desengrasador en funcionamiento



Figura 11. Vista de un desengrasador en funcionamiento

Fuente: extraído de (Estruagua, 2019)

El procedimiento diseño de los desengrasadores, es el siguiente:

a) Determinación del tiempo de retención

De acuerdo a la tabla 21, se puede determinar el tiempo de retención de la siguiente manera:

Tabla 21. Relación del tiempo de permanencia y caudal de afluente

Tiempo de permanencia	Caudal de afluente
3 min	Hasta 10 l/s
4 min	10 – 19 l/s
5 min	20 o más l/s

b) Cálculo de volumen basado en tiempo de retención

A partir de la fórmula de caudal, se tiene que:

$$Vol = Q'_{MH} * t \quad (67)$$

Dónde:

Vol : Volumen de cámara de trampa de grasas (m^3)

Q'_{MH} : Caudal máximo horario de aguas servidas (m^3/min)

t : Tiempo de retención hidráulica (min)

c) Cálculo de área superficial de trampa de grasas

A partir del requerimiento de área superficial o la tasa de aplicación se tiene:

$$At = Ra * Q'_{MH} \quad (68)$$

Dónde:

At : Área superficial de trampa de grasas (m^2)

Q'_{MH} : Caudal máximo horario de aguas residuales (l/s)

Ra : Requerimiento de área $0.25 m^2/(l/s)$

d) Dimensionamiento área superficial de trampa de grasas

Considerando la norma mexicana, con una relación largo/ancho de 1.8, se tiene:

$$L = \sqrt{1.8 * At} \quad (69)$$

$$A = \frac{L}{1.8} \quad (70)$$

Dónde:

L : Largo de superficie de trampa de grasas (m)

A : Ancho de superficie de trampa de grasas (m)

e) Cálculo de altura de ingreso y altura de salida de trampa de grasas

Tomando en cuenta las ecuaciones (66), (67) y (68), y que, la altura de salida es el doble de la altura de entrada, se tiene:

$$Al = \frac{Vol}{A} \quad (71)$$

$$h = \frac{2 * Al}{3 * L} \quad y \quad h1 = 2 * h \quad (72)$$

Dónde:

Al : Área lateral de trampa de grasas (m^2)

h y $h1$: Altura de entrada y salida de trampa de grasas (m)

Se aclara que, tanto la altura de entrada como la de salida no incluyen el borde libre a considerar.

f) Determinación de área y largo del separador de grasas

Considerando lo dispuesto en la Tabla 18, la tasa aplicable para las aguas residuales domésticas es de 0.20 m² por cada l/s de agua residual de ingreso, por lo que tenemos:

$$As = 0.20 * Q'_{MH} \quad (73)$$

$$L' = \frac{As}{A} \quad (74)$$

Dónde:

As : Área de separador de grasas (m²)

L' : Largo de separador de grasas (m)

C) Unidades de tratamiento primario

El (RNE, 2018) señala que, el tratamiento primario tiene como finalidad, eliminar los sólidos sedimentarios orgánicos e inorgánicos, con el fin de disminuir la carga en el tratamiento biológico. Los lodos generados en el proceso deben tratarse antes de su disposición final. Por tu parte la (V.S.B. Bolivia, 2005), indica que, durante este proceso, la mayoría de los sólidos en suspensión se separan o eliminan por procesos de físicos.

Sedimentador primario

Según (MAPAS N° 26, 2015), estos tanques son los que reciben las aguas servidas sin tratado previo, es decir, antes de llegar al tratamiento biológico, y pueden ser con formas rectangulares o circulares. Por su parte el (RAS Título - E, 2000), señala que, el propósito de este proceso es principalmente eliminar los sólidos en suspensión y reducir la DBO en las aguas servidas, mediante el proceso físico de asentamiento en los tanques. Y el (RNE, 2018), establece que los sedimentadores de menor tamaño deben ser proyectados en lo posible sin intervención de equipos mecánicos.

De acuerdo a (Ayala Durán et al, 2008) y (OPS y CEPIS 158, 2005), estas unidades tienen una función similar que desarenador, pero son adecuados para remover partículas de tamaño entre 0.05 mm y 0,2 mm, y pueden dividirse en cuatro áreas: el de entrada que permite la distribución uniforme del afluente, el de sedimentación que es un canal con condiciones de flujo para el asentamiento de las partículas mencionada, la de salida que es un vertedero que está destinada a recolectar el agua servida sin perturbar el proceso de asentamiento y, el área de recolección de

lodos que incluye una tolva capaz de decantar el lodo asentado a través de tuberías y válvulas de drenaje. Para entender mejor el funcionamiento de los sedimentadores se tiene el esquema de la figura 12, donde se aprecia las zonas.

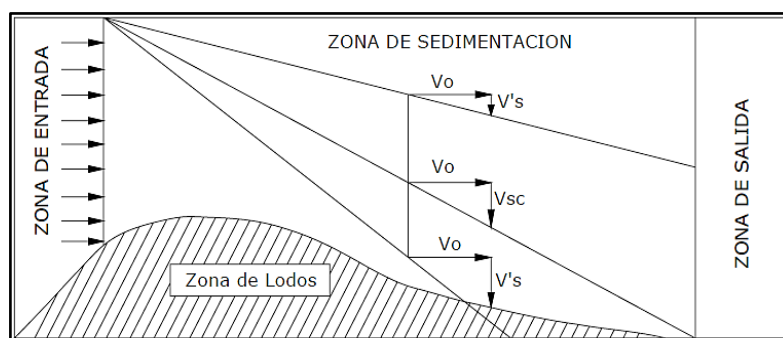


Figura 12. Esquema general de zonas de un sedimentador

Fuente: (Ayala Durán et al, 2008)

Los parámetros de diseño para estas unidades se establecen en la tabla 22:

Tabla 22. Criterios de diseño de sedimentadores, según normas.

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Tanques Rectangulares					
Tiempo de retención P/Caudal máximo	horas	1.5 – 2.5(*)	> 1.0	1.5 – 2.5	1.0 – 2.0
Carga superficial P/Caudal medio	m ³ /m ² /d	24 – 60	33	32 - 49	24 – 30
Velocidad de sedimentación	m/h	1.0 – 2.5	-	-	1 – 1.5
Profundidad del sedimentador	m	2.0 – 3.5(**)	2 – 5	>2.0	>1.5
Relación Largo/Ancho	-	3 – 10	1.5 – 15	3 – 5	>4
Relación Largo/Profundidad	-	5 – 30	-	-	-
Relación Ancho/Profundidad	-	-	-	-	>2
Distancia entre ingreso y disipador	m	-	0.6 – 0.9	-	-
Eficiencia de remoción de DBO	%	30 – 36	-	35 – 45	-
Eficiencia de remoción de SST	%	50 – 60	-	50 – 60	55
Tanques circulares					
Diámetro	m	3.6 – 4.5	3 – 60	<60	-
Profundidad de sedimentador	m	3 – 5	2.5 – 4	2 – 4	-
Pendiente de fondo	%	6 – 16	6 - 17	8	-

Fuente : Diseño propio

Nota: (*) Recomendado menor a 2 horas, (**) Recomendado 3.0 m.

Adicionalmente el (RNE, 2018), nos da una referencia de remoción de DBO y SST, para estimar tiempo de permanencia hidráulica, en tabla 23 se tiene los valores estimados de remoción tomando en cuenta el tiempo de permanencia de las aguas.

Tabla 23. Porcentaje de remoción de contaminantes

Periodo de retención (Hrs)	DBO 100 a 200 mg/l		DBO 200 a 300 mg/l	
	DBO	SST	DBO	SST
1.5	30	50	32	56
2.0	33	53	36	60
3.0	37	58	40	64
4.0	40	60	42	66

Fuente: (RNE, 2018)

Además, señala se debe calcularla cantidad de lodos generados para su depósito, tratamiento y eliminación, bajo los parámetros estipulados en la tabla 24. La eliminación de los lodos de esta unidad debe hacerse de manera continua.

Tabla 24. Gravedad específica y concentración de lodos

Tipo de lodo	Gravedad Específica	% de concentración de sólidos	
		Rango	Recomendado
Con alcantarillado sanitario	1.03	4 – 12	6.0
Con alcantarillado combinado	1.05	4 – 12	6.5
Con lodo activado	1.03	3 – 10	4.0

Fuente: (RNE, 2018)

Por otro lado, la (V.S.B. Bolivia, 2005), indica que la superficie calculada teóricamente debe ajustarse mediante un factor de corrección, para garantizar un buen funcionamiento. Los factores aplicables están en la tabla 25:

Tabla 25. Factor de corrección por influencia del vertedero

Área Superficial Teórica (m ²)	Fv
≤ 50	1.28
75	1.26
100	1.24
125	1.22
150	1.20

Fuente: (V.S.B. Bolivia, 2005)

De acuerdo a (OPS y CEPIS 158, 2005; OPS y CEPIS 163, 2005), el ingreso del agua residual a la zona de sedimentación, debe ser de manera uniforme, para ello, se debe considerar una pantalla de distribución provista de orificios que permitan pasar un flujo con una velocidad no mayor a 15 cm/s.

En la figura 13, se aprecian sedimentadores primarios en funcionamiento.



Figura 13. Batería de sedimentadores primarios en funcionamiento

Fuente: (Farias de Marquez, 2016)

Proceso de diseño de sedimentador rectangular:

a) Cálculo de velocidad de sedimentación

A partir de la tabla 14, para partículas de 0.05mm se tiene:

$$V_s = \frac{1}{18} g \left(\frac{\rho_s - \rho}{\eta} \right) d^2 \quad (75)$$

Dónde:

ρ_s : Peso específico de las partículas (1.3 gr/cm³)

d : Diámetro nominal de partícula (0.05 mm)

Se la velocidad de sedimentación debe encontrarse entre 1.0 a 2.5 m/h.

b) Cálculo de área superficial de la unidad

A partir de la carga superficial aplicable, se determina la velocidad de sedimentación y con ello se tiene lo siguiente:

$$A_s = \frac{Q'_{prom}}{V_s} \quad (76)$$

$$A_t = A_s * F_v \quad (77)$$

Dónde:

Q'_{prom} : Caudal promedio de agua residual (m³/s), la ecuación (11)

V_s : Velocidad de sedimentación (m/s)

A_s : Área superficial teórico del sedimentador (m²)

A_t : Área total del sedimentador (m²)

F_v : Factor de corrección

c) Dimensionamiento del sedimentador

Bajo los parámetros de las normas, consideramos que la relación Largo/Ancho es 4 y una profundidad h=3m.

$$L = \sqrt{A_t * 4} \quad (78)$$

$$A = \frac{L}{4} \quad (79)$$

Dónde:

L : Largo del sedimentador (m)

A : Ancho del sedimentador (m)

d) Cálculo de volumen del sedimentador

$$Vol = A * L * h \quad (80)$$

e) Cálculo de tiempo de retención

A partir de la relación de volumen y caudal máximo horario de aguas residuales, se tiene:

$$T = \frac{Vol}{Q'_{MH}} \quad (81)$$

Este tiempo debe ser mayor a 1 y menor a 2.

f) Distribución de orificios en pantalla difusora

Considerando la velocidad máxima de ingreso de 15 cm/s por cada orificio y considerando una distribución promedio a cada 30 cm, se tiene:

$$A_{TO} = \frac{Q'_{MH}}{0.15 \text{ m/s}} \quad (82)$$

$$n_v = \frac{0.6 * h}{0.3} + 1 \quad (83)$$

$$n_h = \frac{A}{0.3} \quad (84)$$

$$n = n_v * n_h \quad (85)$$

$$A_o = \frac{A_{TO}}{n} \quad (86)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A_o}{\pi}} \quad (87)$$

Dónde:

A_{TO} : Área total de orificios (m²)

n : Número total de orificios

A_o : Área de cada orificio (m²)

D : Diámetro de cada orificio (m o cm)

g) Cálculo de porcentaje de remoción de contaminantes

$$\%R = \frac{T}{a + b * T} \quad (88)$$

Dónde:

a : Constante (a=0.018 para DBO y a=0.0075 para SST)

b : Constante (b=0.02 para DBO y b=0.014 para SST)

Tanque Imhoff

De acuerdo a (OPS y CEPIS 163, 2005) y (RAS Título - E, 2000), a estas unidades también se les denominan tanques de doble acción porque sedimenta y digiere los lodos, son recomendadas para poblaciones menores a 5000 habitantes y se divide en tres compartimentos: cámara de sedimentación, cámara de digestión de lodos, y área de ventilación. Por su parte la (V.S.B. Bolivia, 2005), señala que la operación de este tanque es fácil y no requiere equipos mecánicos; pero, para poder utilizarlo, es fundamental que las aguas servidas se sometan a procesos de pretratamiento de cribado y desarenado; además, es importante tener en cuenta que esta unidad requiere una operación y un mantenimiento cuidadoso. Y el (RNE, 2018), considera que en esta unidad reduce hasta un 50% de sólidos.

En la tabla 26, están los criterios a considerar para el diseño de esta unidad.

Tabla 26. Criterios de diseño de tanque Imhoff, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Cámara de Sedimentación					
Número de sedimentadores	-	2	2	-	2
Carga superficial	m ³ /m ² /d	24	25 – 40	-	24 – 36
Periodo de retención en sedimentador	Horas	1.5 – 2.5	2 – 4	-	2 – 4
Forma de fondo de sedimentador	-	V	V	-	V
Pendiente de fondo de sedimentador	°	50° - 60°	50° - 60°	-	50° - 60°
Abertura para paso de sólidos	cm	15 – 20	15 – 30	-	15 – 30
Prolongación de ranura de transición	cm	15 – 20	15 – 30	-	20
Borde libre mínimo	m	0.30	0.45 – 0.60	-	0.30
Relación larga/ancho	-	-	2 – 5	-	-
Zona de Digestión					
Distancia entre el sedimentador a lodo	m	>0.50	0.30 – 0.90	-	0.30 – 0.90
Inclinación de fondo tronco piramidal	°	15° - 30°	-	-	30° - 45°
Tasa per cápita para 6 meses	l/hab	35 – 140	55 – 100	-	50 – 100
Diámetro mínimo de tubería de purga	mm	200	-	-	200
Carga hidráulica necesaria	m	1.80	-	-	1.80
Área de ventilación y acumulación de natas					
% de superficie del total	%	>30	15 – 30	-	20 – 30
Ancho de área de ventilación	m	>1.0	0.45 – 0.75	-	-

Fuente : Diseño propio

Según (Ayala Durán et al, 2008), estas unidades eliminan entre un 25 y 35% de DBO, y fueron creados para reparar los defectos de los tanques sépticos, evitando que los sólidos se vuelvan a mezclar con las aguas servidas, permitiendo que esos sólidos sean almacenados para su digestión en la misma unidad. El (RNE, 2018), estipula que se debe aplicar los factores de reajuste según la tabla 27, para estimar el volumen de zona de digestión de lodos.

Tabla 27. Factores de capacidad relativa por temperatura

Temperatura °C	Factor de capacidad (fcr)
5	2.0
10	1.4
15	1.0
20	0.7
>25	0.5

Fuente: (RNE, 2018)

En la figura 14, se muestra un esquema de un tanque Imhoff para tener una idea de su funcionamiento.

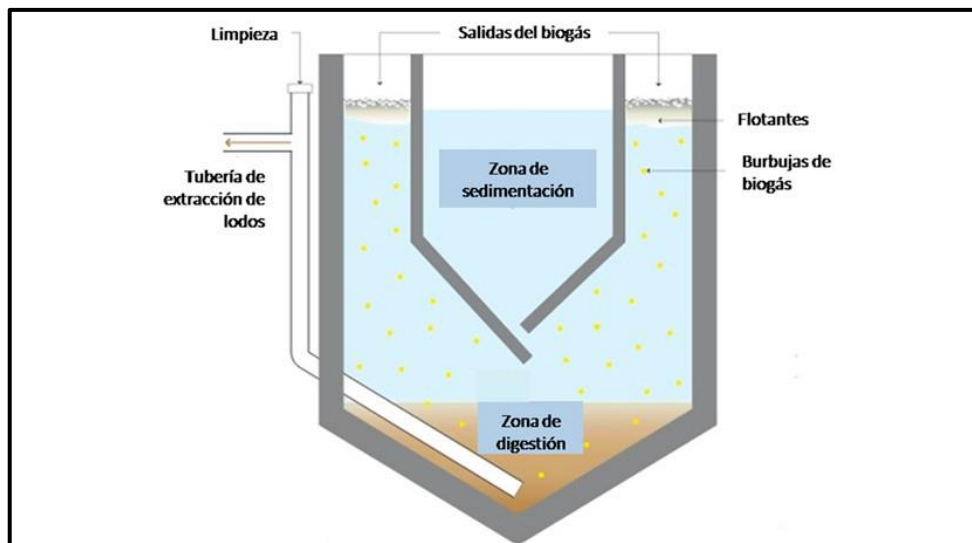


Figura 14. Esquema general de un tanque Imhoff

Fuente: extraído de (Salas, 2020)

El proceso de diseño del tanque Imhoff se detalla a continuación:

a) Área de sedimentadores

$$A_s = \frac{Q'_{prom}}{C_s} \quad (89)$$

Dónde:

Q'_{prom} : Caudal promedio de desagüe (m³/d)

C_s : Carga superficial de diseño (recomendado 24 m³/(m²*d))

b) Cálculo de volumen de cámaras de sedimentación

A partir de la recomendación de las normas se considerará un tiempo de retención de dos horas, basado en el caudal promedio y se tiene:

$$V_s = Q'_{prom} * Tr \quad (90)$$

Dónde:

V_s : Volumen de cámara de sedimentación (m³)

Q'_{prom} : Caudal promedio de desagüe (m³/h)

Tr : Tiempo de permanencia de las aguas recomendada 2 horas (h)

c) Dimensionamiento de cámaras de sedimentación

A partir de las recomendaciones en las normas consultadas, un tanque Imhoff debe tener 2 (n) cámaras de sedimentación, relación de largo/ancho de 4 y una inclinación del fondo de 55° respecto a la horizontal, de donde se tiene:

$$L = \sqrt{\frac{4 * A_s}{n}} \quad (91)$$

$$A = \frac{L}{4} \quad (92)$$

$$H = h_1 + h_2 \quad (93)$$

$$h_1 = \frac{A}{2} * \tan 55^\circ \quad (94)$$

$$h_2 = \frac{\frac{V_s/n}{L} - \frac{h_1 * A}{2}}{A} \quad (95)$$

Dónde:

L : Largo de cada cámara de sedimentación (m)

A : Ancho de cada cámara de sedimentación (m)

H : Altura total de cada cámara de sedimentación (m)

h_1 : Altura fondo inclinado de cada cámara de sedimentación (m)

h_2 : Altura de área rectangular de cada cámara de sedimentación (m)

n : Número de cámaras de sedimentación en el tanque Imhoff

d) Cálculo de ancho total del tanque Imhoff

Considerando 0.25 m de pantalla de las zonas de sedimentación y considerando un 30% de superficie de área de ventilación y acumulación de natas, se tiene:

$$a = \frac{0.3 * \frac{n * (A + 0.5)}{0.70}}{n + 1} \quad (96)$$

$$At = n * (A + 0.5) + (n + 1) * a \quad (97)$$

Dónde:

At : Ancho de cada tanque Imhoff (m)

a : Ancho de cada zona de ventilación en tanque Imhoff (m)

e) Volumen de cámara de digestión y almacenamiento

A partir de la tabla 24, se tiene lo siguiente:

$$fcr = 0.817 * e^{-0.069*T} \rightarrow \text{Para } T \leq 25^{\circ}\text{C} \quad (98)$$

$$Vd = \frac{T_p * P_f * fcr}{1000} \quad (99)$$

Dónde:

Vd : Volumen zona de digestión para 6 meses (m^3)

T_p : Taza de lodos en 6 meses (50 – 100 litros)

P_f : Población futura de diseño (hab)

fcr : Factor de capacidad relativa

T : Temperatura de agua residual ($^{\circ}\text{C}$)

f) Cálculo de altura de cámara de digestión

Tomando en cuenta la inclinación de fondo tronco piramidal de la cámara de digestión que se recomienda 30° y una base de ancho de 0.5 m, tenemos:

$$h_3 = \frac{\left(\frac{At}{n} - 0.5\right)}{2} * \tan 30^{\circ} \quad (100)$$

$$l = L - \left(\frac{At}{n} - 0.50\right) \quad (101)$$

$$Vtp = n * \frac{h_3}{3} * \left(\frac{At}{2} * L + 0.5 * l + \sqrt{\frac{At}{2} * L * 0.5 * l}\right) \quad (102)$$

$$h_4 = \frac{Vd - Vtp}{At * L} \quad (103)$$

Dónde:

h_3 : Altura de fondo tronco piramidal de cámara de digestión (m)

l : Largo de fondo tronco piramidal de cámara de digestión (m)

Vtp : Volumen de fondo tronco piramidal de cámara de digestión (m^3)

h_4 : Altura de parte rectangular de cámara de digestión (m)

D) Unidades de tratamiento secundario

Lagunas anaerobias

El (RNE, 2018) describe que, este tipo de lagunas se usan cuando se dispone terreno limitado o para tratar aguas servidas con altas concentraciones y desechos industriales y por ello es necesario emplear un tratamiento posterior, debe diseñarse dos unidades en paralelo como mínimo de forma cuadrada o ligeramente rectangulares. En tanto el (RAS Titulo - E, 2000) y (V.S.B. Bolivia, 2005) señalan

que, en este tipo de lagunas ocurren dos procesos: los sólidos de las aguas servidas se depositan en el fondo formando una capa de lodo donde las bacterias anaeróbicas descomponen la materia orgánica y generan gas, lo que causa la acumulación de pocas cantidades de lodo. Y el (MAPAS N° 27, 2015), refiere que estas lagunas son poco usadas debido a los problemas relacionados con el mal olor. Por otro lado (Ayala Durán, y otros, 2008), indica que estas lagunas son profundas y mantienen condiciones anóxicas en todo su espesor, donde la acumulación de natas es importante durante operación por mantener las condiciones anaeróbicas cubriendo la superficie.

En la tabla 28, se tienen los criterios a tener en cuenta, para el diseño de estas unidades.

Tabla 28. Parámetros de diseño de lagunas anaeróbicas, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Número de unidades	und	2	2	2	2
Periodo de diseño	años	20 – 30	-	-	-
Periodo de retención	días	1-5	1 – 5	1-5	<5
Carga superficial	KgDBO/Ha/d	>1000	>1000	-	-
Carga volumétrica máxima	gDBO/m ³ /día	100-300	200-400	100-400	100-400(*)
Profundidad	m	2.5-5.0	2.5-5.0	2.5-5.0	>3.0
Relación Largo/Ancho	-	1.0-1.5	-	-	2
Aporte de acumulación de lodos	l/hab/año	>40	40	30-40	30
Periodo de remoción de lodos	Años	-	5-10	-	2-5
% altura máxima para lodos	%	50	-	-	-
Eficiencia de remoción de DBO	%	50	30-70	32-71	60-80
Talud (horizontal/vertical)	-	1.5-2.0	-	-	-

Fuente: elaboración propia

Nota: (*) Estos valores se recomiendan tomando en cuenta la altitud o clima.

Por otro lado, para determinar el tiempo de retención la norma colombiana (RAS Título - E, 2000), recomienda el uso de una relación entre periodo de retención, temperatura y remoción de DBO, como se muestra en la tabla 29:

Tabla 29. Relación temperatura, tiempo de remoción y eficiencia

Temperatura (°C)	Periodo de retención (días)	Remoción de DBO (%)
10 – 15	4 – 5	30 – 40
15 – 20	2 – 3	40 – 50
20 – 25	1 – 2	50 – 60
25 – 30	1 – 2	60 – 70

Fuente: Elaboración propia

Así mismo la norma boliviana contempla recomendaciones para considerar las cargas máximas de DBO aplicables, como se tiene en la tabla 30 para diseñar lagunas de estabilización.

Tabla 30. Valores recomendados de carga máxima aplicable

Zona	Atura (msnm)	Carga volumétrica máxima aplicable		Temperatura del agua (°C)	Saturación de oxígeno disuelto (mg/l)	Radiación solar (Cal/cm ² /d)
		Anaeróbica (gDBO/m ³ /d)	Facultativa (gDBO/m ³ /d)			
Altiplánica	4000	100	100	9	6.8	550
Valles	2500	200	200	21	7.0	300
Llanos	400	400	250	24	8.4	200

Fuente: (DIGESBA - NB 688, 2001)

En la figura 15, se puede apreciar un esquema de una laguna anaeróbica.

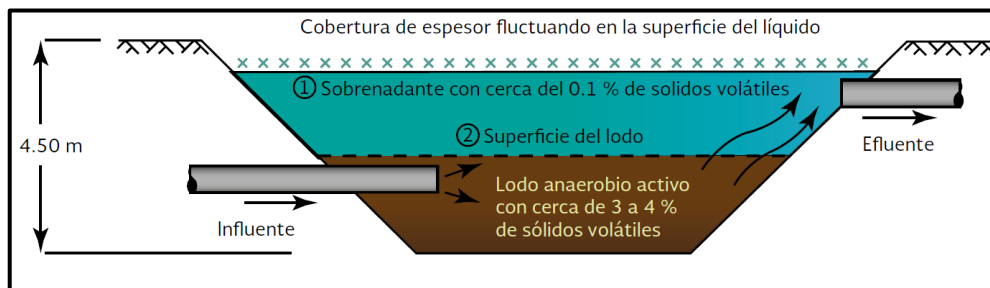


Figura 15. Esquema de laguna anaerobia

Fuente: extraído de (MAPAS N° 27, 2015)

El procedimiento para el diseño de esta unidad se detalla a continuación:

a) Determinación de tiempo de retención

A partir de la tabla 26, se determina la siguiente ecuación lineal:

$$R = -0.2 * T + 7 \quad (104)$$

Dónde:

R : Tiempo de retención (d)

T : Temperatura ambiente del mes más frío (°C)

b) Cálculo de volumen de operación

Tomando en cuenta el tiempo de retención calculado, se tiene que:

$$V = Q'_{prom} * R \quad (105)$$

Dónde:

V : Volumen total de operación (m³)

Q'_{prom} : Caudal promedio de diseño de desagüe (m³/d)

c) Cálculo de carga volumétrica de DBO y volumen de laguna secundaria

Para comprobar la carga volumétrica en caso de una laguna primaria y para obtener el volumen si fuese secundaria, tenemos:

$$Cv = \frac{C_{DBO}}{V} * 1000 \rightarrow \text{Para } L. \text{Primaria} \quad (106)$$

Dónde:

Cv : Carga volumétrica del afluente de DBO (g/(m³*d))

C_{DBO} : Concentración de DBO de afluente ecuación (14) (kg/d)

El valor de la carga volumétrica debe estar dentro de los parámetros máximos de acuerdo a las normas, como lo señala (DIGESBA - NB 688, 2001) de acuerdo a la tabla 27.

d) Cálculo de área a profundidad media

Tomando en cuenta la recomendación de las normas asumimos una altura de 4 m, de donde se tiene:

$$Am = \frac{V}{h} \quad (107)$$

Dónde:

Am : Área a profundidad media de laguna (m²)

h : Altura de laguna sin considerar borde libre (m)

e) Dimensionamiento de las lagunas anaeróbicas

Dependiendo de la cantidad de lagunas (n mínimo 2) y tomando en cuenta una forma cuadrada se tiene:

$$L = \sqrt{\frac{Am}{n}} \quad (108)$$

$$Lsi = L \pm z * h \quad (109)$$

Dónde:

L : Lado a profundidad a media altura de cada laguna (m)

Lsi : Lado superior e inferior respectivo de cada laguna (m)

z : Talud de laguna (recomendado 1.5)

f) Cálculo de periodo de limpieza de lodos

Para un aporte per cápita de lodos de 40 l/(hab*año) o 0.04 m³/(hab*año), tenemos:

$$Vi = n * \frac{(L^2 + Li^2) * h}{4} \quad (110)$$

$$N = \frac{Vi}{Ta * Pf} \quad (111)$$

Dónde:

Vi : Volumen máximo de lodos (50% de profundidad) (m³)

Li : Lado inferior de cada laguna (m)

N : Periodo de limpieza máximo (años)

Ta : Tasa de lodo per cápita (0.04 m³/(hab*año))

Pf : Población futura de diseño ecuación (1), (3) o (5) (hab)

g) Estimación de remoción de DBO

De acuerdo a (RAS Título - E, 2000) y la tabla 28 se deduce lo siguiente:

$$\%rDBO = 2.2857 * T + 1.4286 * R \quad (112)$$

Dónde:

R : Tiempo de retención hidráulica (días)

T : Temperatura de agua más crítico (°C)

$\%rDBO$: % de remoción de DBO teórico

h) Remoción de sólidos suspendidos

De acuerdo a (Ayala Durán et al, 2008) y otras fuentes, se estima que los sólidos suspendidos se remueven hasta un 70%.

i) Remoción de coliformes fecales

De acuerdo a (Ayala Durán et al, 2008) y (V.S.B. Bolivia, 2005), para estimar el porcentaje de remoción de coliformes fecales tanto en lagunas primarias como secundarias, debido a que existe una mezcla completa, se tiene:

$$\frac{CF_e}{CF_a} = \frac{1}{Kb * R + 1} \quad (113)$$

$$Kb = 0.512 * 1.165^{T-20} \rightarrow \text{Primario} \quad (114)$$

$$Kb = 0.601 * 1.108^{T-20} \rightarrow \text{Secundario} \quad (115)$$

Dónde:

CF_e : Coliformes fecales del efluente (NMP/100ml)

CF_a : Coliformes fecales del afluente (NMP/100ml)

Kb : Coeficiente de mortalidad bacteriana (d⁻¹)

T : Temperatura del agua en mes más frío (°C)

Lagunas facultativas

De acuerdo a (Ayala Durán et al, 2008), estas unidades se caracterizan por tener una zona aeróbica en la parte superior y una zona anaeróbica en el fondo, su manera diseñar más conveniente es el empleo de carga orgánica superficial. Por su parte el (RNE, 2018) y (RAS Título - E, 2000) señalan que, estas lagunas se pueden ubicar como una laguna única (en climas fríos donde la carga de diseño es tan baja que permite una adecuada remoción de bacterias) o seguida de lagunas de maduración, así como una unidad secundaria después de una laguna anaerobia o airada para mejorar su tratamiento. Además, la (DIGESBA - NB 688, 2001) indica que, estas lagunas son usadas para remover patógenos y la DBO (hasta un 30%), donde la digestión de sólidos sedimentados se efectúa anaeróticamente, mientras que la capa superior contiene oxígeno porque la fotosíntesis deja crecer las algas y estas producen oxígeno nutriendo así a las bacterias aeróbicas que estabilizan la materia orgánica. Y el (MAPAS N° 27, 2015) afirma que, estas lagunas son las más utilizadas para tratar las aguas servidas domésticas, a las que también se les llama lagunas de oxidación o lagunas fotosintéticas.

En la tabla 31, se tienen los criterios de diseño de las lagunas facultativas a considerar.

Tabla 31. Parámetros de diseño de lagunas facultativas, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Número de unidades en paralelo	und	2	2	2	2
Profundidad	m	>1.5	1.0 - 2.5	1.5 – 2.0	1.5 – 2.0
Periodo de retención	días	>10	5 – 30	5 – 30	-
Periodo de limpieza de lodos	años	5 – 10	10	-	10 – 15
Altura de borde libre	m	0.50	-	0.5 – 0.8	-
Coef. De mortalidad bacteriana a 20°C	día ⁻¹	0.6 – 1.0	0.8 – 1.6	0.1 – 2.0	-
Carga superficial máxima	KgDBO/(Ha*d)	-	-	-	100 – 250
Relación lago/ancho	-	>2	-	2 – 5	3

Fuente: Elaboración propia

El (RNE, 2018) y (RAS Título - E, 2000), estipulan que, para calcular el volumen de lodo en lagunas primarias, se debe considerar la remoción de un 80% de sólidos en suspensión y con una reducción de 50% de sólidos suspendidos por digestión anaerobia, una densidad de lodo de 1.05 kg/l y un contenido de sólidos de 15% a 20% al peso, considerando el periodo de limpieza.

En la figura 16, se aprecia un esquema de una laguna facultativa donde se señala todas sus zonas al igual de su forma.

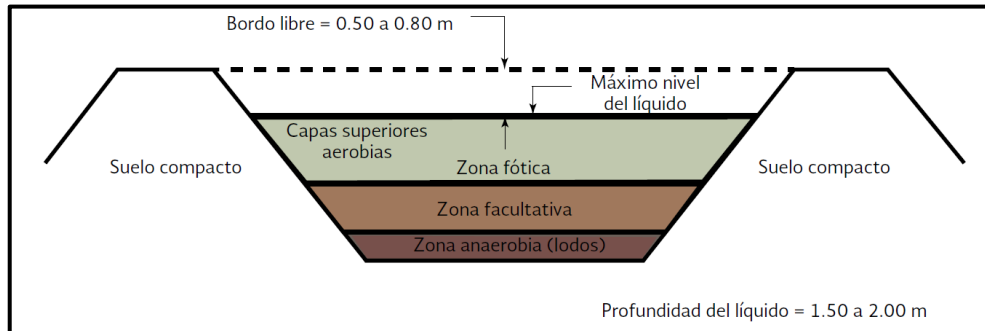


Figura 16. Esquema de una laguna facultativa

Fuente: extraído de (MAPAS N° 27, 2015)

El procedimiento para diseñar estas unidades se detalla a continuación:

a) Cálculo de carga superficial máxima

De acuerdo al (RNE, 2018) y (MAPAS N° 27, 2015), la ecuación más adecuada para el cálculo de la carga superficial es la siguiente:

$$C_s = 250 * 1.05^{T-20} \text{ o } C_s = 250 * 1.085^{T-20} \quad (116)$$

Dónde:

C_s : Carga superficial máxima de diseño (KgDBO/(Ha*d))

T : Temperatura del agua en mes más frío (°C)

La elección del valor quedará a criterio del proyectista, se sugiere que se tome el menor por cuestiones de seguridad.

b) Cálculo de área de lagunas a media altura

De acuerdo a (OPS y CEPIS 163, 2005), se tiene la siguiente ecuación:

$$A_m = \frac{C_{DBO}}{C_s} \quad (117)$$

Dónde:

A_m : Área de laguna a media altura (Ha)

C_{DBO} : Carga orgánica DBO de ecuación (14) (KgDBO/d)

c) Dimensionamiento de las lagunas

Considerando un número “n” de lagunas (mínimo 2), una relación lago/ancho de 3 y una profundidad de 2 m recomendado por normas, se tiene:

$$L = \sqrt{\frac{Am * 3}{n}} \text{ y } A = \frac{L}{3} \quad (118)$$

$$Lsi = L \pm z * h_1 \text{ y } Asi = A \pm z * h_1 \quad (119)$$

Dónde:

L : Largo de cada laguna a media altura (m)

Lsi : Largo superior e inferior de laguna (m)

A : Ancho de cada laguna a media altura (m)

Asi : Ancho superior e inferior de laguna (m)

h_1 : Profundidad de laguna sin borde libre (recomendado 2 m)

z : Talud de terreno para laguna (recomendado 1.5)

d) Cálculo de volumen de lodos y profundidad extra

A partir de las recomendaciones de las normas, tenemos:

$$Vl = \frac{0.8 * 0.5 * C_{SST}}{150 * 1.05} * 365 * N \quad (120)$$

$$h_2 = \frac{Vl}{Li * Ai} \quad (121)$$

Dónde:

Vl : Volumen de lodos en laguna primarias (m³)

C_{SST} : Carga de solidos suspendidos totales de ecuación (16) (kg/d)

N : Periodo de limpieza entre 5 – 10 años (recomendado 10 años)

h_2 : Altura extra para lodos (m)

Li y Ai : Largo y Ancho inferior de la laguna (m)

e) Periodo de retención

Para determinar el periodo de retención, se tiene la siguiente relación:

$$R = \frac{n * Vol}{Q'_{prom}} * fch \quad (122)$$

Dónde:

R : Tiempo de retención de aguas (> 10 días y <30 días)

Vol : Volumen de cada laguna (m³)

fch : Factor de corrección hidráulica (0.3 – 0.8)

f) Estimación de remoción de coliformes fecales

Según (MAPAS N° 27, 2015), partiendo del factor de dispersión, se tiene:

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392 * X + 1.01460 * X^2} \quad (123)$$

$$K_{CF} = 0.841 * 1.07^{T-20} \quad (124)$$

$$a = \sqrt{1 + 4 * K_{CF} * R * d} \quad (125)$$

$$\frac{CF_e}{CF_a} = \frac{4a * e^{\frac{1}{2d}}}{(1+a)^2 * e^{\frac{a}{2d}} - (1-a)^2 * e^{\frac{-a}{2d}}} \quad (126)$$

Dónde:

X : Relación largo/ancho a media altura de laguna

K_{CF} : Coeficiente de mortalidad bacteriana (d^{-1})

a : Constante de diseño

d : Factor de dispersión para flujo disperso

T : Temperatura de agua en mes más frío ($^{\circ}C$)

CF_a y CF_e : Coliformes fecales en afluente y efluente (NMP/100ml)

g) Estimación de DBO de efluente

De acuerdo a (V.S.B. Bolivia, 2005) y (OPS y CEPIS 163, 2005), se determina de manera similar a la remoción de coliformes fecales de donde tenemos:

$$K_{20} = \frac{R}{-14.77 + 4.64 * R} \quad (127)$$

$$K_{DBO} = K_{20} * 1.044^{T-20} \quad (128)$$

$$a = \sqrt{1 + 4 * K_{DBO} * R * d} \quad (129)$$

$$\frac{DBO_e}{DBO_a} = \frac{4a * e^{\frac{1}{2d}}}{(1+a)^2 * e^{\frac{a}{2d}} - (1-a)^2 * e^{\frac{-a}{2d}}} \quad (130)$$

Dónde:

K_{20} : Coeficiente de reacción biológica para $20^{\circ}C$ ($0.2 - 0.3 d^{-1}$)

K_{DBO} : Constante de reacción biológica para temperatura (d^{-1})

DBO_a y DBO_e : Concentración de DBO en el afluente y efluente en (mg/l)

Filtros biológicos

Según (MAPAS N° 25, 2015), son también llamados filtro percolador, que pueden ser diseñado por tipo de carga hidráulica (baja o alta), esta unidad puede ser circular o rectangular y es un tanque que contiene una capa de material grueso, que mayormente son piedras o material sintético. Por su parte la (DIGESBA - NB 688, 2001) señala que, en caso de emplearse piedras las dimensiones deben estar entre 50 a 100 mm y lo más uniforme posible, pero si se emplease material sintético éste debe ser probado en una planta piloto. Además, el (RAS Título - E, 2000) indica que, las aguas residuales se aplican sobre el lecho filtrante en el que se adhiere una población de bacterias que degradan las aguas servidas en proceso de percolado hacia el fondo del tanque, con el tiempo la capa de bacterias incrementa su espesor y se cae hidráulicamente del material grueso pasando así a un clarificador. Y el (RNE, 2018) estipula que, estas unidades deben ser diseñadas de manera tal que, se evite el empleo de equipo mecánico para el que se sugiere el uso de brazos giratorias autopropulsados o por medio de boquillas. Las normas consultadas, coinciden en que, el tratamiento mínimo previo a esta unidad será: el cribado, desarenado y sedimentación primaria.

En cuanto al medio filtrante, siendo éste roca se clasifican en pequeñas (2.5 – 7.5 cm) o medianas (5.0 – 10.0 cm) con una relación de vacíos de 50% y 60% respectivamente (RAS Título - E, 2000). Por su parte el (RNE, 2018) y (MAPAS N° 25, 2015), los clasifican como medianas (2.5 – 6.5 cm) o medianas y grandes (10 - 12 cm). Estos materiales deben ser colocados de manera manual sobre el falso fondo que vendría a ser el medio de drenaje del filtro, hasta una altura de hasta por lo menos de 30 cm de manera que no dañe u obstruya por completo los orificios, considerando que esto perjudicaría el correcto funcionamiento de la unidad. El sistema de ventilación deberá diseñarse de manera que, circule el aire de manera natural a través del lecho de contacto o medio filtrante.

Los criterios de diseño de filtros percoladores se muestran en la tabla 32:

Tabla 32. Parámetros de diseño de filtros biológico, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
CARGA BAJA					
Carga hidráulica de diseño	m ³ /m ² /d	1.0 – 4.0	0.9–3.7 (*)	1.0 – 4.0	0.8 – 2.2
Carga orgánica volumétrica	kgDBO/m ³ /d	0.08 – 0.40	0.1–0.4 (**)	0.08–0.3	0.2 – 0.4
Profundidad de lecho de piedra	m	1.5 – 3.0	1.8 – 2.4	1.8-2.4	1.5 - 3.5
Intervalo de dosificación con sifones	min	5	-	-	-
Pendiente de sistema de drenaje	%	1 – 2	>1	-	>1
Tirante máximo de canal recolector	%	50	50	-	50
Área de orificio en falso fondo	%	>15	15	-	30
Área de orificios de ventilación	%	0.4	-	-	1
Eficiencia remoción DBO	%	-	80 – 90	80 – 90	-
CARGA ALTA					
Carga hidráulica de diseño	m ³ /m ² /d	8 – 40	9.4 – 37.4	10 – 40	>20
Carga orgánica	kgDBO/m ³ /d	0.4 – 4.8	0.5 – 1.0	0.32 – 1	0.5 – 1.8
Profundidad de lecho de piedra	m	1 – 2	0.9 – 1.8	0.9 – 1.8	1.5 – 3.5
Profundidad medio plástico	m	<12	3 – 12.2	<10	-
Razón de recirculación (F)	-	1 – 2	1 – 2	-	-
Intervalo de dosificación con sifones	seg	< 15	-	-	-
Pendiente de sistema de drenaje	%	1 – 2	>1	-	>1
Tirante máximo de canal recolector	%	50	50	-	50
Área de orificio en falso fondo	%	15	15	-	30
Área de orificios de ventilación	%	0.4	-	-	1
Eficiencia remoción DBO	%	-	65 – 85	-	-

Fuente : Elaboración propia

Nota : (*) Para dos etapas sin recirculación se considera valores entre 9.4 – 37.4

(**) Para dos etapas sin recirculación se considera valores entre 1.0 – 1.9

En la figura 17, se aprecia el esquema del funcionamiento de un filtro percolador, con todas sus partes.

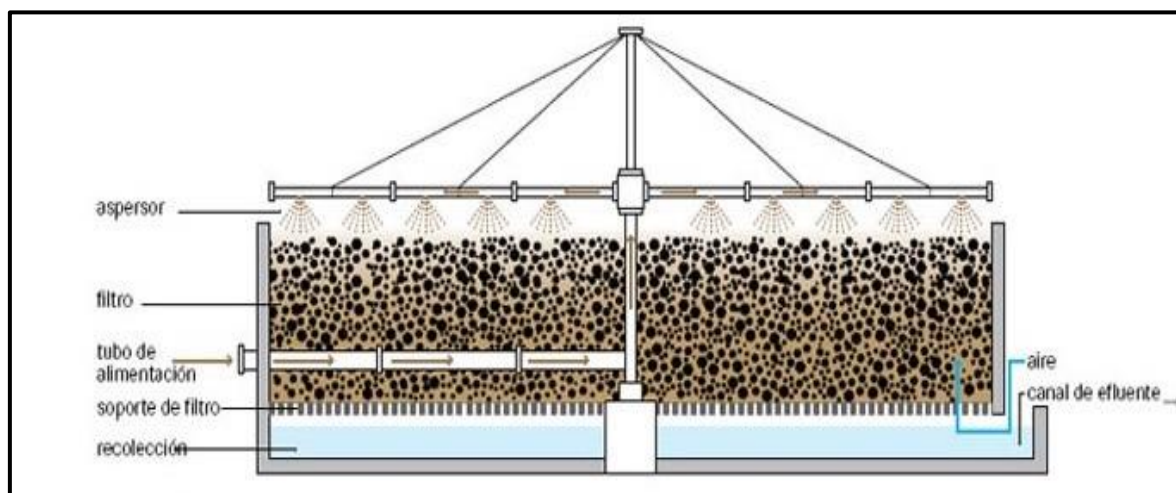


Figura 17. Esquema de un filtro percolador

Fuente: extraído de (Blogger, 2019)

El proceso de diseño se detalla a continuación:

a) Cálculo de carga orgánica (DBO) del afluente

A partir de la ecuación (86), se tiene lo siguiente:

$$C_{DBO1} = \frac{C_{DBO}(100 - R_{DBO})}{100} \quad (131)$$

$$DBO_a = \frac{C_{DBO1}}{Q'_{prom}} \quad (132)$$

Dónde:

C_{DBO1} : Carga orgánica del afluente del filtro (kg/d)

C_{DBO} : Carga orgánica antes de ingresar al sedimentador Ecu. (14) (kg/d)

R_{DBO} : Remoción de carga orgánica en sedimentador Ecu. (86) (%)

DBO_a : Concentración de DBO del afluente (mg/l)

b) Cálculo de eficiencia de remoción de DBO deseada

De acuerdo a la Tabla 18, se debe considerar los LMP (100 mg/l) o ECAs (15 mg/l), de DBO del afluente para su vertimiento o reúso según corresponda, por cuestiones de diseño asumimos un valor de 60 mg/l y un 5% adicional por cuestiones de seguridad, por lo que se tiene:

$$E_T = 1.05 - \frac{60}{DBO_a} \rightarrow \text{Una etapa} \quad (133)$$

$$E_1 = 0.75 * E_T \rightarrow \text{Dos etapas} \quad (134)$$

Dónde:

E_T : Eficiencia de remoción de DBO a considerar solo una etapa

E_1 : Eficiencia de remoción de DBO del filtro 1 (para dos etapas)

c) Cálculo de volumen de filtro o medio de contacto

Tomando como referencia las fórmulas del National Research Council (NRC), considerados en (MAPAS N° 34, 2015), tenemos:

$$F = \frac{1 + R}{(1 + R/10)^2} \quad y \quad R = \frac{Q_{recirculado}}{Q'_{prom}} \quad (135)$$

$$E_1 = \frac{1}{1 + 0.4432 * \sqrt{\frac{C_{DBO1}}{V * F}}} \rightarrow V = \frac{C_{DBO1}}{F} * \left(\frac{0.4432 * E_1}{1 - E_1} \right)^2 \quad (136)$$

$$E_2 = \frac{1}{1 + \frac{0.4432}{1 - E_1} * \sqrt{\frac{(1 - E_1) * C_{DBO1}}{V * F}}} \quad (137)$$

Si se diseña con una sola etapa, se debe considerar $E_1 = E_T$ y no se realiza el cálculo de E_2 .

Donde:

F : Factor o Razón de recirculación (1 sin recircular)

R : Relación del caudal a recircular y el caudal promedio o % a recircular (0% - 100%), 0% si no se contempla la recirculación.

V : Volumen de filtro (m^3)

E_2 : Eficiencia de remoción de DBO del filtro 2 con el mismo volumen

d) Cálculo de la eficiencia de remoción de DBO total de los filtros

Se debe tener en cuenta que, este valor se calcula solamente si se considera 2 etapas.

$$E_T = E_1 + E_2 * (1 - E_1) \quad (138)$$

e) Dimensionamiento de los filtros

A partir de la obtención del volumen o volúmenes y considerando de acuerdo a las recomendaciones una altura promedio de 2 metros para baja carga baja y de dos etapas sin recirculación y de 1.3 metros para alta carga con recirculación, de donde se tiene:

$$A = \frac{V}{h} \quad (139)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * A}{\pi * n}} \quad o \quad L = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad (140)$$

Dónde:

h : Altura del medio de contacto (m)

A : Área total del filtro (m^2)

n = Número de filtros en paralelo

D : Diámetro de los filtros si son circulares (m)

L : Longitud de lado de filtros si son cuadrados (m)

f) Cálculo de carga hidráulica

$$CH = \frac{Q'_{prom}}{A} \quad (141)$$

Dónde:

CH : Carga hidráulica de corroboración según tabla 31 ($m^3/m^2/d$)

Reactor anaerobio de flujo ascendente (RAFA)

De acuerdo al (RNE, 2018) y (RAS Titulo - E, 2000), esta tecnología es la modificación del proceso de contacto anaerobio, que incluye un reactor, donde el que el afluente se introduce por medio de un distribuidor que está en el fondo y fluye hacia verticalmente pasando por un medio de contacto anaeróbico, siendo los tipos más comunes: el de lecho fluidizado o lodo granular (medio de contacto arena) que permite cargas orgánicas elevadas, y el RAFA con manto de lodo soporta pequeñas cargas orgánicas e hidráulicas. Por su parte la (V.S.B. Bolivia, 2005) señala que, esta unidad consta de un tanque, al se instala un decantador en la parte superior (con el fin separar los sólidos que se juntan) y un deflector (para los gases que se producen) los cuales se superponen, el proceso de esta unidad es como de un tanque Imhoff de flujo invertido. Y de acuerdo a (MAPAS N° 28, 2015), la forma de un RAFA, puede ser rectangular o circular que muestran solamente los tubos recolectores de biogás ya que puede estar cubierto por completo.

La tabla 33, indica los criterios de diseño que deben ser adoptados:

Tabla 33. Criterios de diseño de RAFA, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
CARGA BAJA CON MANTO DE LODOS					
Carga superficial de diseño	m ³ /m ² /h	1.2 – 1.5	0.7	0.6 – 0.8	-
Carga orgánica volumétrica	kgDQO/m ³ /d	1.5 – 2.0	1 – 2	1 – 2	2.5 – 3.5
Carga hidráulica volumétrica	m ³ /m ³ /d	-	-	<4	-
Tiempo de retención hidráulica (**)	horas	-	6 – 14	6 – 14	8 – 10
Altura de sedimentador y colector gas	m	1.5	1.5 – 2.0	1.5 – 2.0	-
Inclinación de paredes	°	50 – 60	50 – 60	45 – 60	45
Abertura para paso de solidos	cm	15 – 20	-	-	-
Superposición en aberturas (*)	cm	15 – 20	10 – 20	10 – 20	-
Velocidad de paso por aberturas (***)	m ³ /(m ² *h)	5	5	5.5 – 6.0	5.5 – 6.0
Velocidad ascensional (***)	m ³ /(m ² *h)	1	0.7	0.9 – 1.1	1.5 – 2.0
Altura de reactor	m	3 – 5	5.5 – 7.0	3 – 6	4.5 – 6.0
Puntos de alimentación	m ² /punto	0.5 – 2.0	0.5 – 3.0	1 – 2	2 – 4
Dist. entre fondo y tubería distribución	cm	20	-	10 – 15	-
Velocidad máxima de salida de gas	m ³ /(m ² *h)	1	1	1	-
Volumen del RAFA máximo	m ³	400	500	-	-
Tubería de distribución	mm	-	-	75 -100	75 – 100
Tubería de descarga de lodos	mm	-	-	100 -150	-
Tubería de muestro de lodos	mm	-	-	25 – 50	-
CARGA ALTA CON LODO GRANULAR					
Carga orgánica volumétrica	kgDQO/m ³ /d	15 – 20	8 – 12	>4	-
Altura de sedimentador y colector gas	m	1.5 – 2.0	1.5 – 2.0	1.5 – 2.0	-
Superposición en aberturas (*)	cm	15 – 20	10 – 20	10 – 20	-
Velocidad de paso por aberturas	m ³ /(m ² *h)	3	5	2 – 2.3	-
Puntos de alimentación	m ² /punto	2 – 5	>2	>2	-
Velocidad de salida de gas	m ³ /(m ² *h)	3 – 5	-	3 – 5	-
Volumen del RAFA máximo	m ³	1500	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

Nota :(*) Referida a la proyección de los sedimentadores sobre los deflectores, (**) Basado en el caudal promedio de diseño, (***) Basado en el caudal máximo horario de diseño

El tratamiento previo a estas unidades deben ser las cribas, desarenadores y trampa de grasas de ser necesarias, según las normas consultadas.

Por otro lado (RAS Titulo - E, 2000) y (MAPAS N° 28, 2015), recomiendan tomar en cuenta la tabla 34, para determinar el tiempo de retención hidráulica en este componente.

Tabla 34. Tiempos de retención hidráulicos para diferentes temperaturas.

Rango de temperatura (°C)	Valores TRH (h)		
	Q'_{prom}	Q'_{MD}	Q'_{MH}
16 – 19	10 – 14	7 – 9	3 – 5
22 – 26	7 – 9	5 – 7	>3
>26	>6	>4	>2.5

Fuente: (RAS Titulo - E, 2000) y (MAPAS N° 28, 2015).

En la figura 18, se aprecia un esquema de un RAFA, tanto en su forma y su funcionamiento.

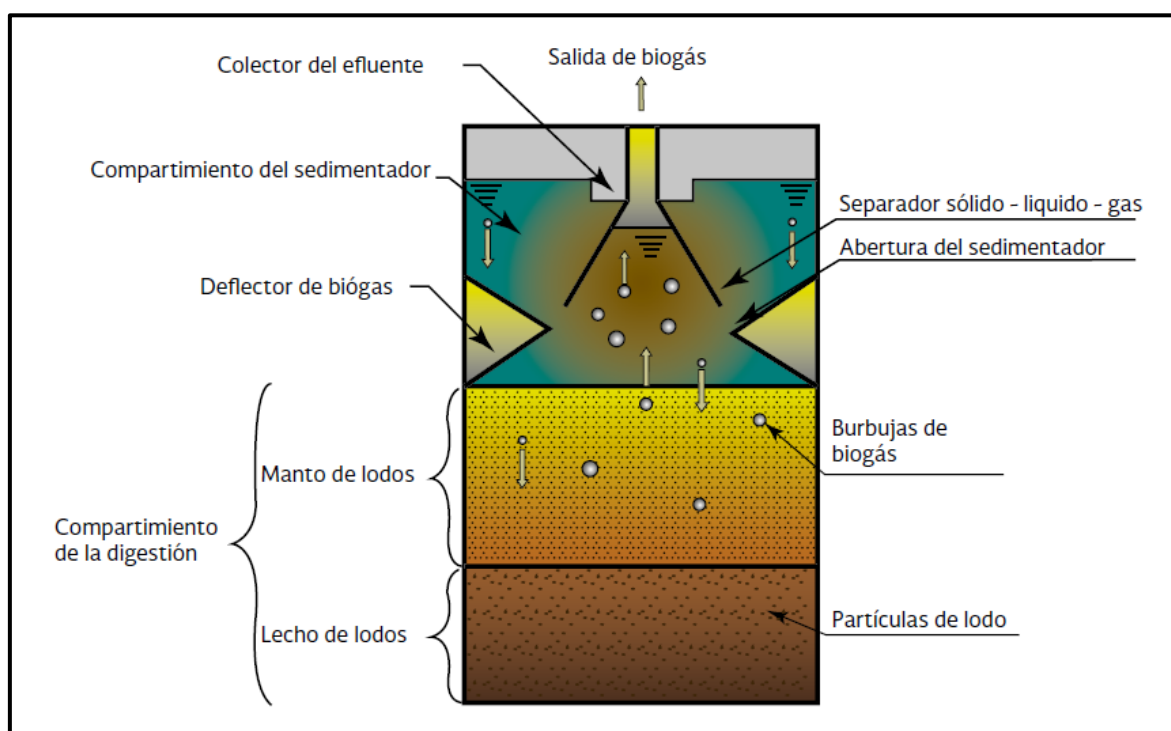


Figura 18. Esquema de un RAFA

Fuente: extraído de (MAPAS N° 28, 2015)

El procedimiento de diseño del RAFA, se detalla a continuación:

a) Cálculo de carga de DQO en el afluente

De la ecuación (15), tenemos el valor de la carga de DQO del afluente.

b) Determinación de tiempo de retención hidráulica

A partir de la Tabla 33, podemos determinar lo siguiente:

$$TRH = 50.274 * e^{-0.082*T} \quad (142)$$

Dónde:

TRH : Tiempo de retención hidráulica para caudal promedio (h)

T : Temperatura de agua residual (°C)

c) Cálculo de volumen total y unitario de reactores

Teniendo el tiempo de retención hidráulica, tenemos:

$$V = Q'_{prom} * TRH \quad (143)$$

$$Vu = \frac{V}{n} \quad (144)$$

Dónde:

V : Volumen total (m³)

Vu : Volumen unitario de cada unidad (m³)

n : Número de unidades en paralelo

d) Estimación de altura de reactor

Partiendo de la recomendación de la velocidad de ascenso de 1 m/h en promedio, tenemos lo siguiente:

$$H = \frac{Vel * TRH}{K1} \quad (145)$$

Dónde:

Vel : Velocidad ascensional para caudal máximo horario

Para temperaturas entre 15 – 30 °C será 1.0 m/h

Para temperaturas entre 10 – 15 °C será 0.8 m/h

K : Coeficiente de caudal máximo horario de ecuación (10)

e) Determinación de área de cada unidad y dimensionamiento

Teniendo en cuenta los volúmenes unitarios, la altura y una relación algo/ancho de cada unidad de 1.5, tenemos:

$$At = \frac{V}{H} \quad (146)$$

$$Au = \frac{Vu}{H} \quad (147)$$

$$L = \sqrt{1.33 * Au} \quad y \quad A = \frac{L}{1.33} \quad (148)$$

Dónde:

Au : Área de cada unidad de reactor (m²)

At : Área total de los reactores (m^2)

L y A : Largo y ancho de cada unidad (m)

f) Verificación de cargas aplicadas

Partiendo de lo calculado anteriormente, tenemos:

$$CHV = \frac{Q'_{prom}}{V} \quad (149)$$

$$COV = \frac{C_{DQO}}{V} \quad (150)$$

Dónde:

CHV : Carga hidráulica volumétrica menor a 4 ($m^3/m^3/d$)

COV : Carga orgánica volumétrica entre 1 – 2 ($kgDQO/m^3/d$)

C_{DQO} : Carga orgánica DQO ecuación (15) ($kgDQO/d$)

g) Sistema de distribución unitario de agua residual (afluente)

A partir de que COV sea menor a 1 – 2 $kgDQO/m^3/d$, podemos asumir un área de influencia de cada punto (tubo) de 2 m^2 .

$$Nd = \frac{L * A}{Ad} \quad (151)$$

Dónde:

Nd : Número de puntos de ingreso de afluente

Ad : Área de influencia de cada punto

h) Estimación de eficiencia de remoción de contaminantes

De acuerdo a (MAPAS N° 28, 2015), tenemos lo siguiente:

$$E_{DQO} = 100 * (1 - 0.68 * TRH^{-0.35}) \quad (152)$$

$$E_{DBO} = 100 * (1 - 0.7 * TRH^{-0.5}) \quad (153)$$

Dónde:

E_{DQO} : Eficiencia de remoción de DQO (%)

E_{DBO} : Eficiencia de remoción de DBO (%)

TRH : Tiempo de retención hidráulica (horas)

i) Producción teórica de metano y biogás

A partir de la remoción de DQO el (MAPAS N° 28, 2015), asumiendo un 20% de que se queda en el lodo sugiere:

$$DQO_{CH4} = (E_{DQO} - 0.2) * C_{DQO} \quad (154)$$

$$Kt = \frac{P * K_{QDO}}{R * (273 + T)} \quad (155)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{Kt} \quad (156)$$

$$Q_g = \frac{Q_{CH_4}}{0.7} \quad (157)$$

Dónde:

DQO_{CH_4} : DQO que será transformado en metano (kgDQO/d)

Kt : Factor de corrección por temperatura

P : Presión atmosférica (1 atm)

K_{DQO} : DQO correspondiente a una molécula de CH₄ (64 gDQO/mol)

R : Constante del gas (0.08206 atm L/mol K)

T : Temperatura de operación del reactor (°C)

Q_{CH_4} : Producción de metano volumétrico (m³/d)

Q_g : Producción de biogás volumétrico a recolectar (m³/d)

j) Cálculo de número de colectores de gas en cada unidad

Tomando en cuenta la liberación de gas según normas y tomando en cuenta que el recolector tendrá un ancho de 0.5m a lo largo de cada unidad, tenemos:

$$A_g = \frac{Q_g}{V_g} \quad (158)$$

$$N_g = \frac{A_g}{0.5 * L * n} \quad (159)$$

Dónde:

A_g : Área total requerida para recolectar el gas (m²)

V_g : Velocidad máxima de salida de gas (1 m/h)

N_g : Número de colectores de gas en cada unidad

k) Dimensionamiento de las aberturas entre el compartimiento del sedimentador y deflectores

Tomando en cuenta la velocidad de paso recomendada en las normas de 5.5 m/h basada en el caudal máximo de diseño, tenemos:

$$A_{rab} = \frac{Q'_{MH}}{5.5 \text{ m/h}} \quad (160)$$

$$A_{nab} = \frac{A_a}{2 * n * N_g * L} \quad (161)$$

Dónde:

A_{rab} : Área total para cumplir con la velocidad de paso (m²)

A_{nab} : Ancho de la abertura campana y deflector (m)

l) Dimensionamiento de campana recolectora de gas y cámara de sedimentación

Tomando en cuenta las recomendaciones de las normas tenemos:

$$Ac = \frac{A - Ng * (0.25 + 0.1)}{2 * Ng} - 0.13 \quad (162)$$

$$h1 = Ac * \tan \theta \quad (163)$$

$$h2 = H - h1 \quad (164)$$

Dónde:

Ac : Ancho de media campana (m)

$h1$: Altura de campana (m)

$h2$: Altura del compartimiento de digestión manto más lecho de lodo (m)

θ : Angulo de inclinación respecto a la horizontal ($50^\circ - 60^\circ$)

m) Cálculo de producción de lodos

De acuerdo a (MAPAS N° 28, 2015), tenemos:

$$Vl = \frac{Y * DQO_{aplicada}}{\gamma * Cl} \quad (165)$$

Dónde:

Vl : Volumen de producción de lodos (m^3/d)

Y : Coeficiente de producción de sólidos (0.1 – 0.2 kgSST/kgDQO)

DQO_{ap} : Carga de DQO aplicada al sistema (kgDQO/d)

γ : Densidad del lodo (1020 – 1040 kgSST/ m^3)

Cl : Concentración de sólidos en el lodo (4%)

Filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA)

Según (MAPAS N° 29, 2015), el FAFA es un tipo de tratamiento de aguas servidas con biopelícula fija para remover materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Por otro parte el (V.S.B. Bolivia, 2005) define que, el FAFA es un reactor que estabiliza la materia orgánica mediante la acción de los microorganismos que se adhieren al material del medio filtrante y la forma de esta unidad puede ser rectangular o circular. Y Según (RAS Titulo - E, 2000), el medio filtrante debe ser de preferencia material grava sin finos con medias entre 4 y 7 centímetros, que pueden ser piedras trituradas o angulosas, en caso de que se use otro medio, el ingeniero debe sustentar las razones de su elección.

Los parámetros o criterios de diseño, se detallan en la tabla 35:

Tabla 35. Parámetros de diseño de fafa, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Número de unidades en paralelo	und	-	2	2	2
Carga hidráulica superficial	m ³ /(m ² *d)	-	-	6 – 10	1 – 10 (**)
Carga orgánica volumétrica total	KgDBO/(m ³ *d)	-	-	0.15 – 0.5	0.08 – 0.7
Carga orgánica en medio filtrante	KgDBO/(m ³ *d)	-	-	0.25 – 0.75	-
Altura del medio filtrante	m	-	-	0.8 – 3	1 – 3
Tiempo de residencia hidráulica	horas	-	5.3 – 7(*)	5 – 10	6 – 13
Medio filtrante	-	-	-	Piedra	Piedra
Eficiencia de remoción de DBO	%	-	-	65 – 75	75 – 80

Fuente: Elaboración propia

Nota: (*) Estos valores dependen de la concentración de DBO del afluente (65 – 3000 mg/l)

(**) Estos valores y los de carga orgánica, dependen de la temperatura del agua

En la figura 19, se aprecia un esquema de un FAFA, donde se puede ver su forma y su funcionamiento en general.

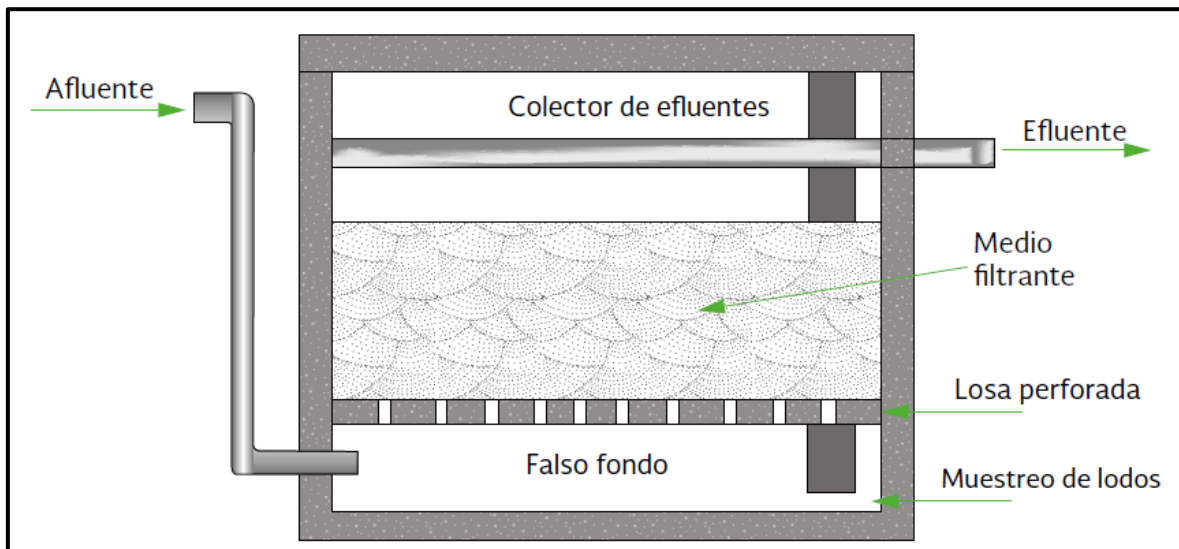


Figura 19. Esquema funcional de FAFA

Fuente: extraído de (MAPAS N° 29, 2015)

El proceso de diseño de filtros anaeróbicos de flujo ascendente, se detalla a continuación:

a) Determinación de carga hidráulica superficial del filtro

De acuerdo a (V.S.B. Bolivia, 2005), se deduce que:

$$CHS = 1.0012 * e^{0.1152*T} \rightarrow \text{Para } T \leq 20 \quad (166)$$

Dónde:

CHS : Carga Hidráulica Superficial, si $T > 20$ $CHS = 10$ (m³/(m²*d))

T : Temperatura de agua residual (°C)

b) Cálculo de área superficial del filtro

Según (MAPAS N° 29, 2015), tenemos que:

$$At = \frac{Q'_{prom}}{CHS} \text{ y } Au = \frac{At}{n} \quad (167)$$

Dónde:

At : Área total de FAFAs (m^2)

Au : Área unitaria de cada FAFA (m^2)

Q'_{prom} : Caudal promedio (m^3/d)

n : Número de FAFAs

c) Dimensionamiento de área de FAFA

Una vez calculado el área unitaria de cada FAFA y una relación largo/ancho de 2, tenemos:

$$L = \sqrt{2 * Au} \text{ y } B = \frac{L}{2} \quad (168)$$

Dónde:

L : Largo de cada FAFA (m)

B : Ancho de cada FAFA (m)

d) Determinación de carga orgánica volumétrica

De acuerdo a (V.S.B. Bolivia, 2005), se deduce que:

$$COV = 0.0005 * T^2 + 0.0202 * T + 0.09 \rightarrow \text{Para } T \leq 20 \quad (169)$$

Dónde:

COV : Carga orgánica volumétrica si $T > 20$ $COV = 0.7$ ($kgDBO/m^3 \cdot d$)

e) Cálculo de volumen de FAFA

De acuerdo a (MAPAS N° 29, 2015), tenemos:

$$Vt = \frac{C_{DBO}}{COV} \text{ y } Vu = \frac{Vt}{n} \quad (170)$$

Dónde:

Vt : Volumen total de FAFAs (m^3)

Vu : Volumen unitario de FAFA (m^3)

C_{DBO} : Carga orgánica de afluente ($kgDBO/d$)

f) Cálculo de altura de FAFA y medio filtrante

Teniendo el volumen y el área de los FAFAs, se da que:

$$H = \frac{Vt}{At} \quad (171)$$

$$H_f = H - 1.05 \quad (172)$$

Dónde:

H : Altura total de los FAFAs no incluye borde libre (m)

H_f : Altura de medio filtrante de los FAFAs (m)

g) Cálculo de tiempo de residencia hidráulica

Teniendo volumen y caudal, se da:

$$R = \frac{Vt}{Q'_{prom}} \quad (173)$$

Dónde.

R : Tiempo de residencia hidráulica

h) Estimación de eficiencia de remoción de DBO

De acuerdo a (MAPAS N° 29, 2015), tenemos:

$$r_{DBO} = 100 * (1 - 0.87 * R^{-0.5}) \quad (174)$$

E) Unidades de tratamiento terciario

Lagunas de maduración

De acuerdo a (Ayala Durán et al, 2008) y (RNE, 2018), son lagunas totalmente aeróbicas, que tiene como función principal prever un periodo hidráulico de permanencia extra para eliminar patógenos y mejorar la calidad del agua tratada. Por su parte el (RAS Titulo - E, 2000) señala que, la eliminación de bacterias en cualquier clase de laguna debe estimarse en índices de coliformes fecales, y el proyectista debe utilizar el modelo de flujo diseminado. Y el (MAPAS N° 27, 2015) afirma que, si se degrada los niveles de DBO aceptables para su descarga a corrientes de agua, la concentración de los coliformes fecales generalmente es muy alta, por lo que se recurre al uso de lagunas de maduración.

En cuanto a los criterios de diseño se muestran en la tabla 36:

Tabla 36. Parámetros de diseño de lagunas de maduración, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Relación Largo/Ancho	-	1 – 8	1 – 8	1 – 2	3
Periodo de retención hidráulica	días	>10 (*)	>10 (*)	-	>2
Carga superficial aplicable	-	-	-	-	-
Profundidad de la laguna	m	-	0.9 – 1.5	0.9 – 1.5	1.0 – 1.5
Coefficiente de mortalidad	d^{-1}	$K_{20} * 1.05^{T-20}$	$K_{20} * 1.07^{T-20}$	$0.841 * 1.07^{T-20}$	$2.6 * 1.19^{T-20}$
Factor de dispersión	-	0.12 – 1.0	0.12 – 1.0	-	-

Fuente : Elaboración propia

Nota : (*) Referido el tiempo de retención mínimo en un sistema de lagunas.

Por otro lado, estas lagunas de maduración pueden ser modificados en su diseño implementando pantallas o mamparas, tomando en consideración una distribución de anchos de manera que, la relación Largo/Ancho sea entre 20 a 50. Por supuesto, esto no implica cambiar las áreas totales calculados mediante el proceso que se detallará en esta unidad.

En la figura 20, se puede apreciar la forma de una laguna de maduración.



Figura 20. Vista de una laguna de pulimento o maduración

Fuente: extraído de (MAPAS N° 27, 2015)

Proceso de diseño de lagunas de maduración y/o pulimento:

a) Determinación de área media de la laguna de maduración

A partir de un tiempo de retención hidráulica de 6 días y una altura de 1.20m, tenemos:

$$Am = \frac{Q'_{prom} * R}{h} \quad (175)$$

$$Amu = \frac{Am}{n} \quad (176)$$

Dónde:

R : Tiempo de retención hidráulica (días)

h : Altura de la laguna de maduración sin borde libre (1.20 m)

Am : Área media total de las lagunas de maduración (m²)

Amu : Área media de cada laguna de maduración (m²)

n : Número de lagunas de maduración

b) Dimensionamiento de cada laguna de maduración

A partir del área media de cada laguna y una relación de Largo/Ancho de 2, tenemos

$$L = \sqrt{2 * Amu} \quad y \quad A = \frac{L}{2} \quad (177)$$

$$Lsi = L \pm h * z \quad y \quad Asi = A \pm h * z \quad (178)$$

Dónde:

L : Largo a media altura de la laguna de maduración (m)

A : Ancho a media altura de la laguna de maduración (m)

Lsi : Largo superior e inferior de la laguna de maduración (m)

Asi : Ancho superior e inferior de la laguna de maduración (m)

z : Talud en los laterales de la laguna de maduración 1.5

c) Remoción de coliformes fecales

$$d = \frac{X}{-0.26118 + 0.25392 * X + 1.0146 * X^2} \quad (179)$$

$$K_{CF} = 0.841 * 1.07^{T-20} \quad (180)$$

$$a = \sqrt{1 + 4 * K_{CF} * R * d} \quad (181)$$

$$CF_e = \frac{CF_a * 4 * a * e^{1/2d}}{(1 + a)^2 * e^{a/2d} - (1 - a)^2 * e^{-a/2d}} \quad (182)$$

Dónde:

d : Factor de dispersión

X : Relación Largo/Ancho de laguna

T : Temperatura de agua (°C)

K_{CF} : Tasa de primer orden de remoción de coliformes fecales (d^{-1})

CF_a y CF_e : Concentración de CF en afluente y efluente (NMP/100ml)

d) Condiciones del efluente

La remoción de BDO se aplica de similar manera que la remoción de coliformes fecales, pero tomando en consideración que:

$$K_{20} = \frac{R}{-14.77 + 4.64 * R} \quad (183)$$

$$K_{DBO} = K_{20} * 1.044^{T-20} \quad (184)$$

$$a = \sqrt{1 + 4 * K_{DBO} * t * d} \quad (185)$$

$$\frac{DBO_e}{DBO_a} = \frac{4a * e^{\frac{1}{2a}}}{(1+a)^2 * e^{\frac{a}{2a}} - (1-a)^2 * e^{\frac{-a}{2a}}} \quad (186)$$

e) Inclusión de mamparas en las lagunas de maduración

Considerando una relación Largo/Ancho de 30, tenemos:

$$L1 = \sqrt{30 * Amu} \quad (187)$$

$$A1 = \frac{L1}{30} \quad (188)$$

$$n = \frac{L}{A1} - 1 \quad o \quad n = \frac{A}{A1} - 1 \quad (189)$$

Dónde:

L1 : Largo total del canalizado con mamparas (m)

A1 : Ancho del canal entre mamparas (m)

n : número de mamparas en laguna de maduración

F) Etapa de desinfección

De acuerdo al (RNE, 2018), se considera esta etapa en caso de requerirse una alta calidad bacteriológica, donde el más empleado es el diseño de instalaciones de cloración donde se considera la dosis de cloro, el tiempo de contacto y el diseño de la cámara correspondiente. Según (RAS Título - E, 2000), la desinfección debe realizarse en el efluente de plantas de tratamiento, si este representa un riesgo para la salud en las localidades aguas debajo del punto de vertimiento y los procesos pueden ser de cloración e irradiación ultravioleta. El (MAPAS N° 27, 2015) señala que, la eficiencia se mide en la eliminación de coliformes y huevos de helmintos. Finalmente, la (DIGESBA - NB 688, 2001), estipula que, el uso de otros métodos de desinfección como ozono debe apoyarse en estudios de viabilidad.

La razón por la que no se realizará el diseño de estas unidades, son porque en la actualidad existen empresas que proveen de equipos para esta etapa y también porque es necesario intervención mecánica.

G) Tratamiento de lodos

Para realizar el diseño de las unidades para el tratamiento de lodos, se debe tener en cuenta la producción de lodos en los procesos de tratamiento de la planta.

Digestores anaerobios de lodos

El (RNE, 2018) sostiene que, la digestión es un proceso que, destinado a estabilizar, reducir el volumen e inactivar los patógenos de los lodos, que deben ser provenientes de plantas primarias y/o secundarios con filtros biológicos. El (RAS Título - E, 2000) por su parte señala, que este proceso es bioquímicamente complejo, con varios grupos anaerobios y facultativos que digieren y destruyen la materia orgánica al mismo tiempo. Por su parte el (MAPAS N° 25, 2015) afirma que, la materia orgánica almacenada en la mezcla de lodos primarios y secundarios, se transforma en metano y bióxido de carbono, este proceso se lleva a cabo en un reactor cerrado completamente, donde se introducen los lodos de manera continua o intermitente, y es uno de los procesos más antiguos utilizados.

Los criterios de diseño de estas unidades se dan a continuación en la tabla 37:

Tabla 37. Criterios de diseño de digestores de lodos, según normas

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
TASA ESTÁNDAR					
Carga volumétrica	kgSSV/m ³ /d	-	0.5 – 1.6	0.64 – 1.6	-
Tiempo de retención	días	-	30 – 60	20 – 55	-
Altura de tanque	m	-	3 – 7	7.6 – 13.7	-
TASA ALTA					
Carga volumétrica	kgSSV/m ³ /d	1.6 – 8.0	1.6 – 4.8	1.6 – 6.41	-
Tiempo de retención	días	10 – 30	10 – 20	10 – 20	-

Fuente: Elaboración propia

Para su diseño hay que tomar en cuenta que, el fondo debe tener una inclinación de con talud de 4 con la finalidad de que se pueda extraer los lodos estabilizados mediante bombeo o manualmente.

En la figura 21, se aprecia un esquema de funcionamiento de un digestor de lodos convencional.

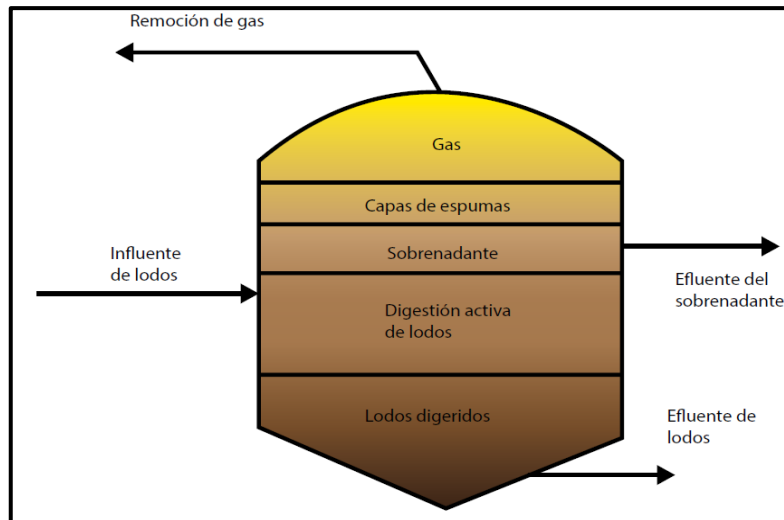


Figura 21. Esquema de un digestor convencional

Fuente: extraído de (MAPAS N° 25, 2015)

Proceso de diseño de digestor anaeróbico de lodos estándar de una sola etapa:

a) Cálculo de tiempo de retención de lodos

De acuerdo a (MAPAS N° 25, 2015), se tiene un rango de 10 a 35 °C de temperatura, a los que le corresponden 20 y 55 días, por lo que tenemos:

$$t = 83.992 * e^{-0.041*T} \quad (190)$$

Dónde:

t : Tiempo de retención de lodos (d)

T : Temperatura de ambiente promedio en mes más frío (°C)

b) Determinación de carga volumétrica de diseño

De acuerdo a (RNE, 2018), nos recomienda usar la tasa más alta en climas calientes y bajas en climas fríos, de donde tenemos:

$$Cv = 0.044 * T + 0.06 \quad (191)$$

Dónde:

Cv : Carga volumétrica de diseño (kgSSV/m³/d)

c) Cálculo de volumen total y unitario de digestores

Con lo determinado anteriormente y un peso específico de lodo aproximado de 1050 kg/m³, tenemos:

$$V = \frac{Cv * t * Var}{1050} \quad (192)$$

Dónde:

V : Volumen total de digestores (m^3)

Var : Volumen máximo diario de agua residual en un día (m^3)

d) Dimensionamiento de digestor de lodos

Tomando como referencia la norma colombiana, asumimos una altura de 5 m, por lo que tenemos:

$$A = \frac{V}{5} \quad (193)$$

$$D = \sqrt{\frac{A * 4}{\pi}} \quad (194)$$

Lechos de secado de lodos

Según (RNE, 2018) y (DIGESBA - NB 688, 2001), el uso de estas unidades, por lo general es la forma más fácil y de menor costo para deshidratar los lodos estabilizados, cuyo volumen debe ser estimado. Por su parte el (RAS Título - E, 2000) señala, que los lechos de secado eliminan el contenido de agua hasta en un 30% para poder manejarlo como sólido. Y (MAPAS N° 25, 2015) afirma, que la extracción del agua de los lodos, ocurre por filtración del agua mediante un lecho filtrante de arena y grava o piedras, el agua filtrada se drena a través de tuberías cribadas.

En la tabla 38, se tienen los parámetros de diseño de estas unidades.

Tabla 38. Criterios de diseño para lecho de secado de lodos

Parámetros	Unidad	Valores			
		Normas Perú	Normas Colombia	Normas México	Normas Bolivia
Periodo de secado	Semanas	3 – 8	-	-	3 – 8
Capas de aplicación sobre el lecho	Veces	1 -2	1 -2	1 – 2	1 – 2
Profundidad útil del lecho de secado	m	0.5 – 0.6	>0.5	0.4 – 0.6	0.5 – 0.6
Altura de medio de soporte sobre filtro	cm	15	-	-	-
Altura de medio filtrante arena	cm	10	30 – 46	10 – 23	15
Altura de medio de drenaje grava	cm	20	20 – 46	20 – 46	30 – 40
Pendiente de fondo de lecho	%	1.5	>1.0	>0.5	1.5
Ø mínimo de tubo de drenaje en Canal	cm	10	10	10	10

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente para determinar el área de los lechos de secado, las normas de México y Colombia nos dan los datos que se muestran en la tabla 39:

Tabla 39. Datos para determinar área de lecho de secado de lodos

Fuente de lodo	Lechos abiertos	Lechos cerrados	Unidad
Primarios digeridos	0.09 – 0.14	0.07 – 0.09	$m^2/capita$
Primarios y activados	0.16 – 0.23	0.12 – 0.14	$m^2/capita$
Primario y filtros percoladores	0.12 – 0.17	0.086 – 0.145	$m^2/capita$

Fuente: (RAS Titulo - E, 2000) y (MAPAS N° 25, 2015).

En la figura 22, se puede apreciar el esquema de un lecho de secado de lodos que se encuentra al aire libre.

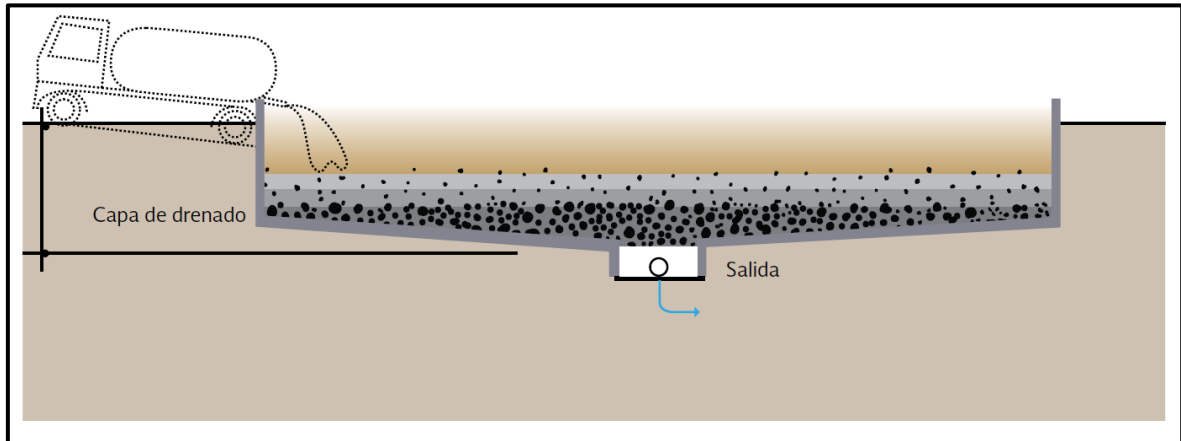


Figura 22. Esquema de un lecho de secado de lodos

Fuente: extraído de (MAPAS N° 25, 2015)

Proceso de diseño de lechos de secado de lodos:

a) Cálculo de área de lecho de secado

Dependiendo del tipo de lodo a ser deshidratado, tenemos:

$$A = Ap * Pf \quad (195)$$

$$Au = \frac{A}{n} \quad (196)$$

Dónde:

A : Área total de lecho de secado

Au : Área de cada lecho de secado

n : Número de lechos de secado (mínimo 2)

b) Dimensionamiento de lechos de secado

Con las recomendaciones de las normas, tenemos:

$$H = hu + hs + ha + hg + b \quad (197)$$

$$L = \frac{Au}{a} \quad (198)$$

Dónde

H : Altura total del muro de lecho de secado (m)

hu, hs, ha, hg y b : Altura útil y alturas de soporte, arena, graba y borde libre (m)

L : Largo de lecho de secado de lodos (m)

a : Ancho definido de lecho de secado de lodos (3 – 6 m)

3.6. Método de análisis de datos

Para la evaluación e interpretación de las comparativas obtenidas del procedimiento realizado, estas se probarán con la realización de diseños de componentes evaluados de plantas de tratamiento de aguas residuales, esto con la ayuda de herramientas informáticas como es el Microsoft Excel y para realizar los dibujos de las formas de los componentes nos apoyaremos en el AutoCAD.

3.7. Aspecto ético

Luego de haber revisado el código de ética de la Universidad Cesar Vallejo referentes a las investigaciones, en cumplimiento de la Ley universitaria 30220, donde indica que la investigación es una función esencial y obligatoria de la universidad. Es preciso resaltar el artículo 9º del capítulo II, indica que, los investigadores deben cumplir con las condiciones establecidas en sus proyectos de investigación y asegurarse de que su investigación se lleve a cabo en estricto cumplimiento de los requisitos éticos, legales y de seguridad. En tal sentido, puedo afirmar que esta investigación se ha realizado respetando es código de ética de esta casa superior de estudios.

IV. RESULTADOS

Se muestra como resultado, el diseño hidráulico de cada unidad para el que se ha propuesto un procedimiento de diseño en base a los criterios comparados de las normas revisadas.

Los datos iniciales con el que se han realizado todos los cálculos son al azar, donde se asume que los diseños realizados son para una localidad que tiene un clima frío, con una temperatura de ambiente de 10 °C, además que las viviendas tienen un área mayor a 90 m², y se toma en cuenta para la caracterización del afluente los aportes per cápita de contaminantes según lo estipulado en las normas para poblaciones donde no se tiene un estudio de las aguas residuales.

Diseño hidráulico de unidades de PTAR

A) Análisis y medición de datos básicos

Periodo de diseño

El periodo de diseño para este caso será de 20 años, debido a que es un valor muy usado en nuestro medio y además es un periodo intermedio recomendado por las normas.

Población de diseño

Se determinó la población de diseño por los tres métodos propuestos y en este caso se tomó el valor intermedio, tal y como se muestra en la tabla 40:

Tabla 40. Estimación de población de diseño.

i	Año (t_i)	Población (P_i)	r		
			Aritmético	Geométrico	Exponencial
1	1975	3123			
2	1986	3827	0.02049	0.01865	0.01848
3	1995	4352	0.01524	0.01439	0.01428
4	2007	4249	-0.00197	-0.00199	-0.00200
5	2021	4949	0.01177	0.01095	0.01089
			r = 0.01138	r = 0.01050	r = 0.01042
RESULTADOS					
Periodo de Diseño	Año proyectado	Población Futura			
		Aritmético	Geométrico	Exponencial	
20	2039	6076	6099	6096	

Para los diseños, se toma como población de diseño 6076 habitantes, que corresponde al método aritmético.

Caudales de diseño

A partir de la obtención de la población de diseño se calculó los caudales de diseño, tomando en cuenta las dotaciones de agua potable, asumiendo que la localidad no tiene un estudio de consumo, además de que el clima considerado es frío y las viviendas tienen un área mayor de 90 m², como se muestra en la tabla 41:

Tabla 41. Resultado de caudales de diseño.

Detalle	Caudales de diseño	
	Agua potable	Agua residual
Caudal promedio	12.66 l/s	10.13 l/s
Caudal máximo diario anual	14.46 l/s	13.17 l/s
Caudal máximo horario	31.14 l/s	24.91 l/s

Características del afluente

Tomando en cuenta los aportes per cápita por habitantes de contaminantes según las normas y el caudal promedio de diseño de aguas residuales, se tienen los resultados de la caracterización del afluente, que se muestran en la tabla 42:

Tabla 42. Resultado de características del afluente

Detalle	Concentración de contaminantes
Cargas	
Carga orgánica DBO	328.10 kg/día
Carga inorgánica DQO	668.36 kg/día
Carga de sólidos en suspensión totales (SST)	546.84 kg/día
Carga de coliformes fecales totales (CF)	1.22*10 ¹⁵ NMP/día
Concentración	
Concentración de DBO	374.87 mg/l
Concentración de DQO	763.64 mg/l
Concentración de SST	624.79 mg/l
Concentración de CF	1.39*10 ⁹ NMP/100 ml

B) Unidades de tratamiento preliminar

Canal de ingreso y cámara de rejas de limpieza manual

Tabla 43. Dimensiones de canal de ingreso y cámara de rejas.

Detalle	Variable	Dimensión
Largo del canal	L	Variable
Ancho del canal	b	0.35 m
Alto del canal	h	0.35 m
Pendiente	S	1 ‰
Espesor de las barras	e	5 mm
Forma de las barras	-	Rectangular
Largo de barras	L _b	0.46 m
Angulo de inclinación de rejas	θ	50°
Número de barras	N _b	11
Espaciado entre barras	a	20 mm
Longitud de plataforma	L _p	0.70 m

Las dimensiones de estas unidades de han determinado basado principalmente en el caudal máximo horario, los resultados se aprecian en la tabla 43:

Asimismo, se muestra en la figura 23, la forma de esta unidad.

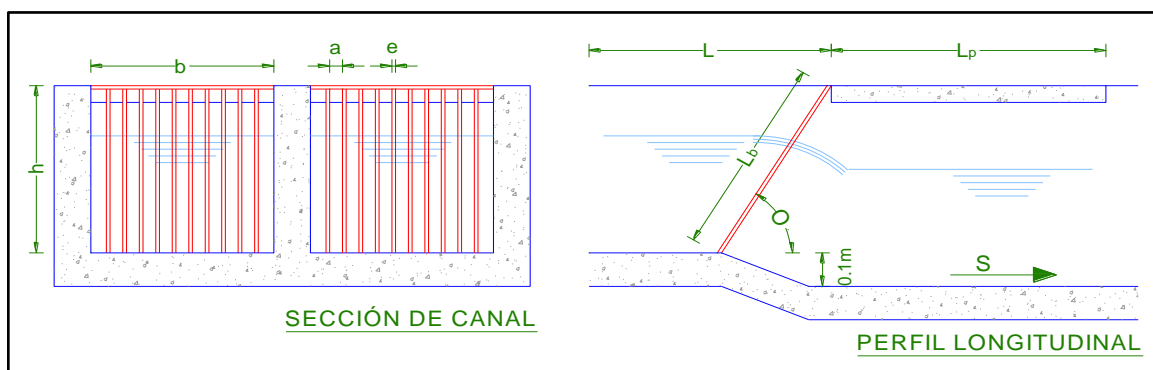


Figura 23. Forma típica de canal de ingreso y cámara de rejas

Desarenadores de flujo horizontal

a) Controlado por canal Parshall

Las dimensiones del desarenador controlado por aforador Parshall, son las que se muestran en la tabla 44:

Tabla 44. Diseño de desarenador controlado por aforador Parshall

Detalle	Variable	Dimensión
Canal desarenador		
Largo del canal desarenador	L_T	6.75 m
Ancho superficial canal desarenador	A_{sd}	0.45 m
Ancho de fondo de canal desarenador	A_{fd}	0.15 m
Altura de canal desarenador	h_d	0.45 m
Cámara de almacenamiento de arena		
Ancho de cámara	A_c	0.15 m
Profundidad de cámara	h_c	0.20 m
Aforador Parshall – medidas estandarizadas		
Ancho de garganta	W	7.6 cm
Longitud de paredes de la sección convergente	A	46.6 cm
Longitud de la sección convergente	B	45.7 cm
Ancho de la salida	C	17.8 cm
Ancho de la entrada de la sección convergente	D	25.9 cm
Profundidad total	E	38.1 cm
Longitud de la garganta	F	15.2 cm
Longitud de sección divergente	G	30.5 cm
Longitud de las paredes de la sección divergente	H	29.9 cm
Diferencia de la elevación entre la salida y la cresta	K	2.5 cm
Longitud de la transición de la entrada	M	30.5 cm
Profundidad de la cubeta	N	5.7 cm
Ancho de la entrada de la transición	P	76.8 cm
Radio de curvatura	R	40.6 cm
Abscisa del punto de medición	X	2.5 cm
Ordenada del punto de medición	Y	3.8 cm

En las figuras 24 y 25, se muestra la forma que debe presentar esta unidad que incluye el aforador Parshall.

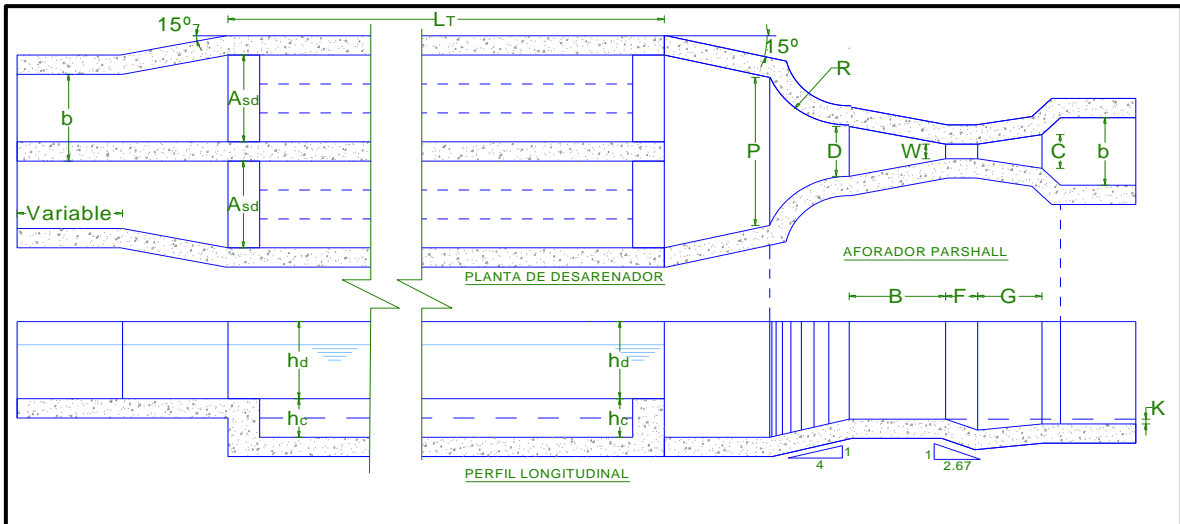


Figura 24. Plana y perfil de desarenador con aforador Parshall

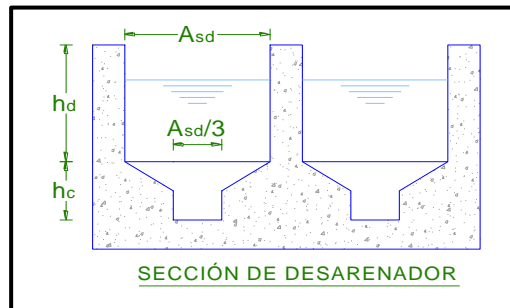


Figura 25. Sección típica del desarenador

b) Controlado por vertedero sutro

Las dimensiones del desarenador controlado por un vertedero sutro, son las que se muestran en la tabla 45:

Tabla 45. Dimensiones de desarenador controlado por vertedero Sutro

Detalle	Variable	Dimensión
Canal desarenador		
Largo del canal desarenador	L	7.50 m
Ancho de desarenador	B	0.50 m
Altura del canal desarenador	H	0.35 m
Altura de cámara de arena	h	0.15 m
Pendiente	S	1 ‰
Vertedero sutro		
Ancho de garganta	b	0.20 m
Longitud de paredes de la sección convergente	a	0.04 m

La forma de este tipo de desarenador se muestra en la figura 26:

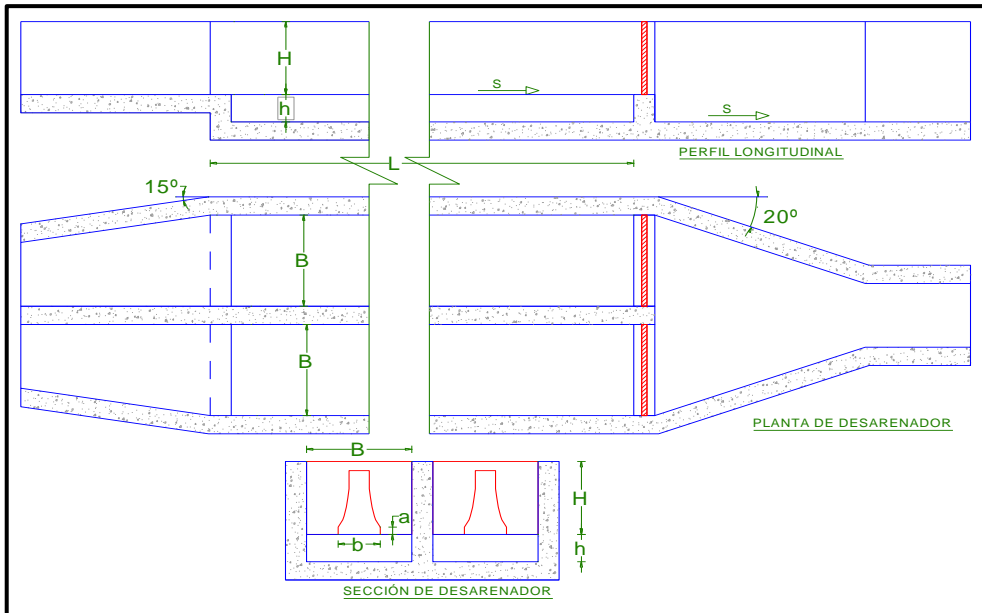


Figura 26. Forma del desarenador controlado por vertedero sutro

Trampa de grasas o desengrasador

Los resultados obtenidos en el diseño de esta unidad se muestran en la tabla 46:

Tabla 46. Dimensiones de desengrasador

Detalle	Variable	Dimensión
Largo total de desengrasador	L	3.35 m
Largo de separador de grasas	L'	2.60 m
Ancho del desengrasador	A	1.90 m
Tirante de agua en ingreso	h	0.80 m
Tirante de agua en salida	h1	1.60 m
Borde libre	-	0.40 m

La forma de esta unidad se muestra en la figura 27:

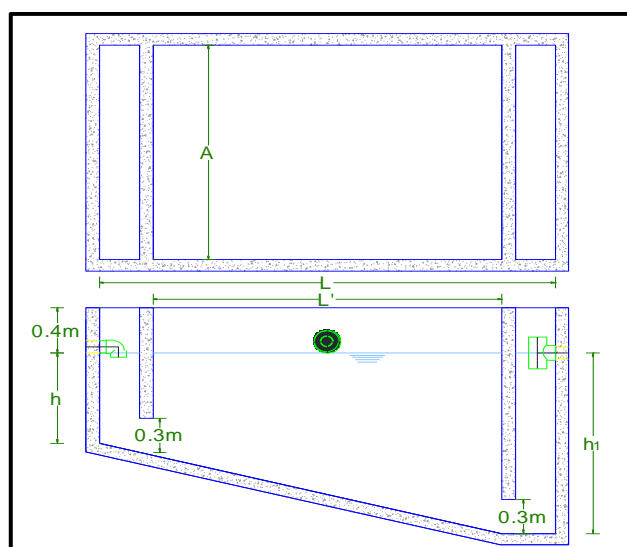


Figura 27. Forma de trampa de grasas

C) Unidades de tratamiento primario

Sedimentador primario

Los resultados del diseño de un sedimentador primario, se muestran en la tabla 47, cabe resaltar que este componente debe construirse dos como mínimo

Tabla 47. Resultados del diseño del sedimentador primario

Detalle	Variable	Dimensión
Sedimentador		
Largo del sedimentador primario	L	13.00 m
Ancho del sedimentador primario	A	3.40 m
Pendiente de fondo para lodos	S	10 ‰
Altura recomendada del sedimentador	H	3.00 m
Borde libre	-	0.40 m
Diferencia de cotas entre el ingreso y salida	-	0.05 m
Pantalla de distribución de caudal		
Diámetro de orificios	D	0.06 m
Número de orificios verticales	n_v	7
Número de orificios horizontales	n_h	11
Remoción de contaminantes		
Remoción de DBO	R_{DBO}	30.52 %
Remoción de sólidos en suspensión totales	R_{SST}	51.76 %

La forma de un sedimentador primario rectangular, es como se muestra en la figura 28:

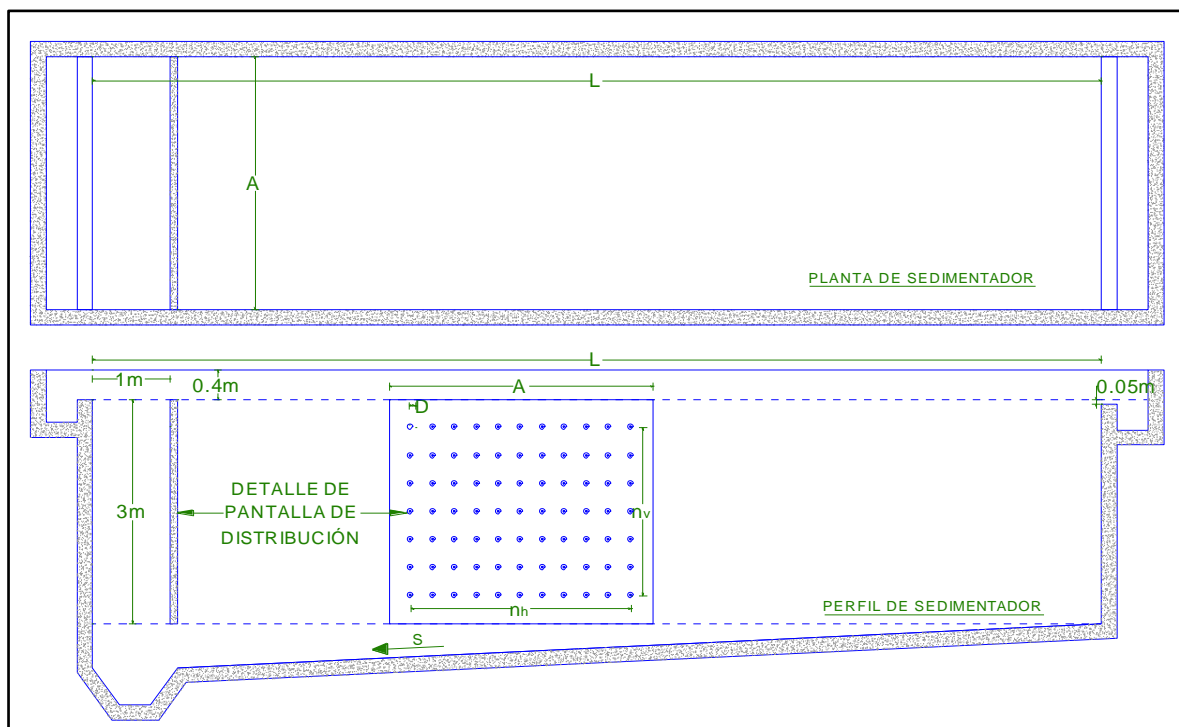


Figura 28. Forma de un sedimentador primario rectangular

Tanque Imhoff

Los resultados del diseño realizado son para una población de diseño de 4000 habitantes con una taza de per cápita de lodos de 60 litros en 6 meses, bajo las mismas condiciones antes consideradas, y se muestran en la tabla 48:

Tabla 48. Resultados de diseño de un tanque Imhoff

Detalle	Variable	Dimensión
Sedimentador		
Número de cámaras de sedimentación	-	02 und
Largo de las cámaras de sedimentación	L	6.95 m
Ancho de las cámaras de sedimentación	A	1.75 m
Altura de fondo inclinado de sedimentador	h_1	1.25 m
Altura de zona rectangular de sedimentador	h_2	1.35 m
Zona de ventilación y natas		
Número de zonas de ventilación y natas	-	3 und
Ancho de cada zona de ventilación y natas	a	0.65 m
Ancho total del tanque Imhoff	A_t	6.45 m
Borde libre	-	0.50 m
Zona de digestión de lodos		
Altura de fondo tronco piramidal (tolva)	h_3	0.80 m
Altura de zona rectangular de cámara de digestión	h_4	7.15 m
Remoción de contaminantes		
Remoción de DBO	R_{DBO}	30 %
Remoción de sólidos en suspensión totales	R_{SST}	45 %

La forma de esta unidad se muestra en las figuras 29 y 30:

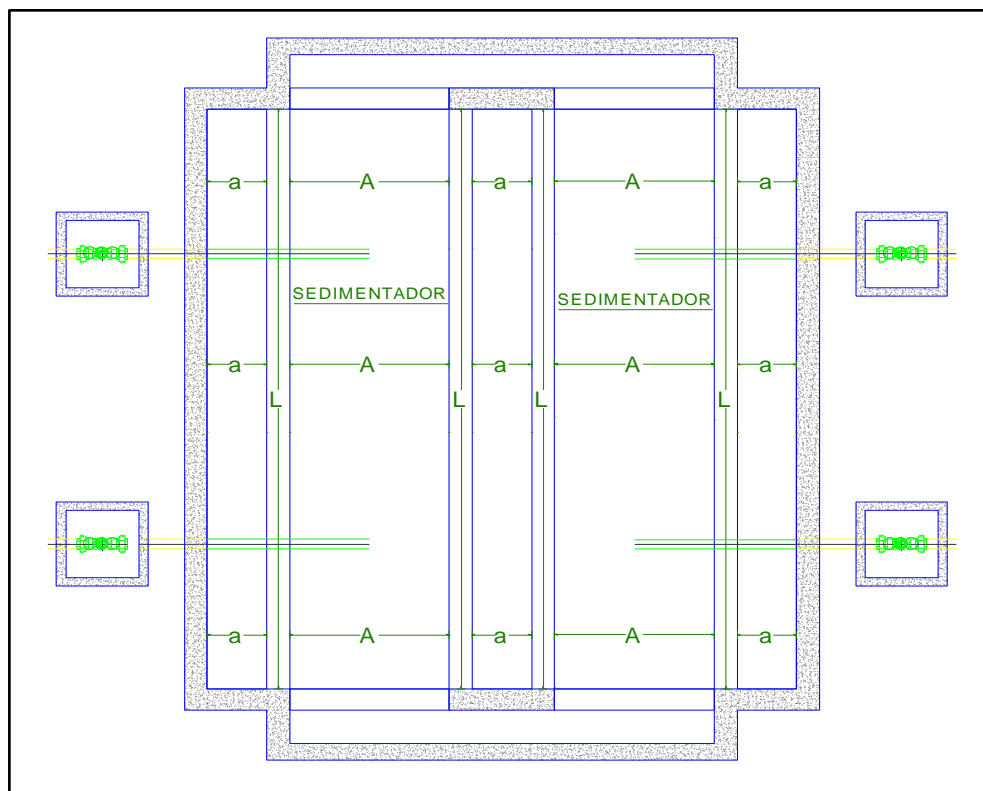


Figura 29. Vista en planta de un tanque Imhoff

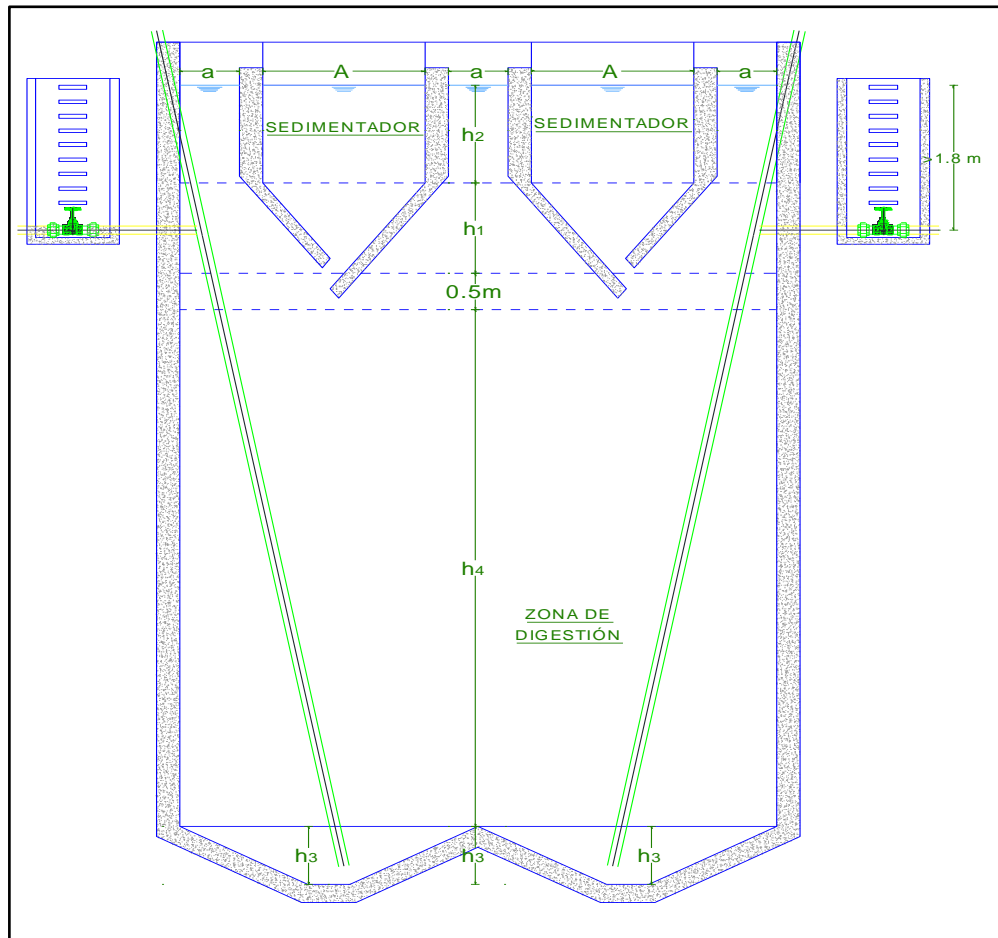


Figura 30. Vista de sección de tanque Imhoff

D) Unidades de tratamiento secundario

Lagunas anaerobias

El resultado del diseño realizado de estas unidades, son las que se muestran en la tabla 49:

Tabla 49. Dimensiones de lagunas anaeróbicas

Detalle	Variable	Dimensión
Número de lagunas	-	02 und
Lado superior	L_s	29 m
Lado inferior	L_i	17 m
Altura de laguna	H	4 m
Borde libre	-	0.5m
Talud del dique	z	1.5
Remoción de contaminantes		
Remoción de DBO	R_{DBO}	30 %
Remoción de sólidos en suspensión totales	R_{SST}	70 %
Remoción de coliformes fecales	R_{CF}	35.69 %

La forma de esta unidad de muestra en la figura 31:

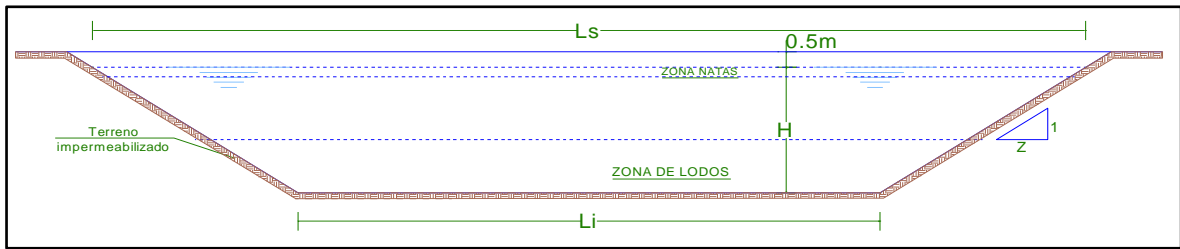


Figura 31. Forma de lagunas anaeróbicas

Lagunas facultativas

Los resultados del diseño realizado de estas unidades, se muestran en la tabla 50:

Tabla 50. Dimensiones de lagunas facultativa

Detalle	Variable	Dimensión
Número de lagunas	-	02 und
Largo superior	L_s	216 m
Largo inferior	L_i	210 m
Ancho superior	A_s	74 m
Ancho inferior	A_i	68 m
Altura de laguna facultativa	h_1	2.00 m
Altura extra para lodos (solo lagunas primarias)	h_2	0.35 m
Borde libre	-	0.50 m
Talud del dique	z	1.5
Remoción de contaminantes		
Remoción de DBO	R_{DBO}	95.18 %
Remoción de sólidos en suspensión totales	R_{SST}	95 %
Remoción de coliformes fecales	R_{CF}	99.74 %

La forma de estas unidades de muestra en la figura 32:

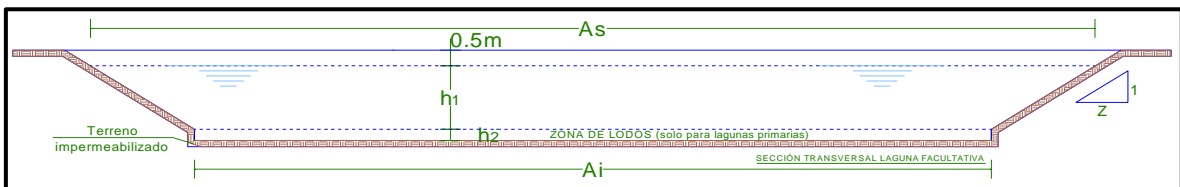


Figura 32. Sección transversal de laguna facultativa

Filtros biológicos

Los resultados del diseño de estas unidades, se muestran en la tabla 51:

Tabla 51. Dimensiones de filtros biológicos o percoladores

Detalle	Variable	Dimensión
Número de filtros biológicos (en paralelo)	-	02 und
Lado del filtro	L	5.50 m
Altura de filtro	H	2.00 m
Fondo libre	-	0.50 m
Pendiente de fondo	S	1%
Remoción de contaminantes		
Eficiencia de remoción de DBO (En una etapa)	R_{DBO}	50 %
Eficiencia de remoción de DBO (En dos etapas)	R_{DBO}	81%

La forma de esta unidad es la que se muestra en la figura 33:

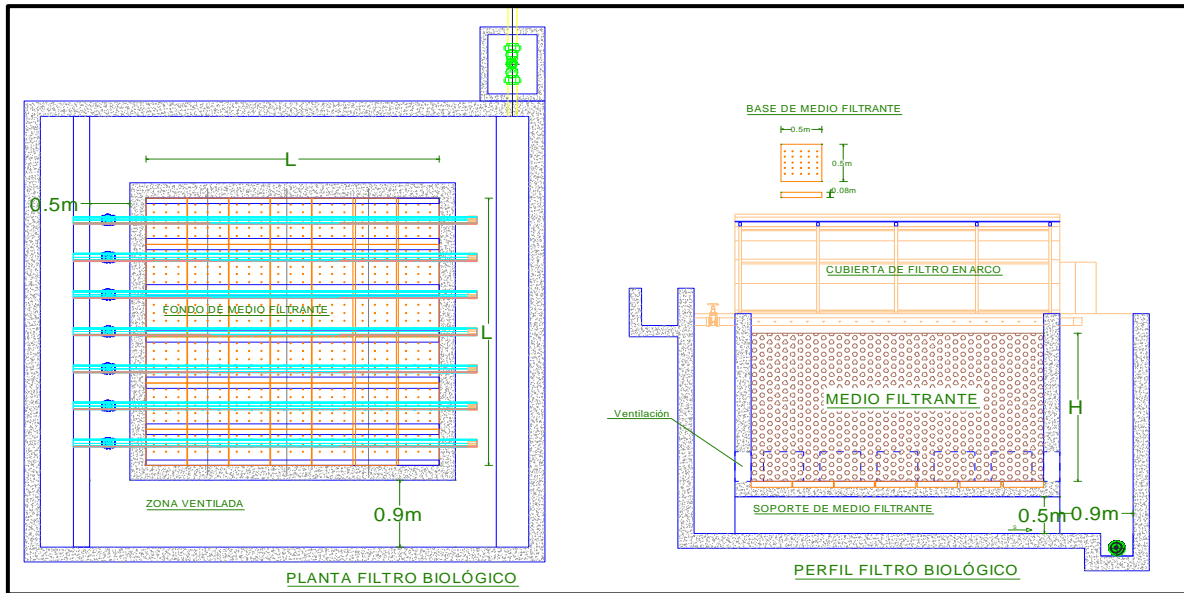


Figura 33. Forma del filtro biológico

Cabe aclarar que, esta unidad como se muestra es en una sola etapa, y que debe construirse dos unidades en paralelo. Por otro lado, si se considerase dos etapas, esta unidad deberá construirse uno detrás de otro, es decir, en total deberá construirse 4 unidades con la finalidad de cumplir como paralelos.

Rector anaeróbico de flujo ascendente (RAFA)

Los resultados del diseño de estas unidades, se muestran en la tabla 52:

Tabla 52. Dimensiones de RAFA

Detalle	Variable	Dimensión
Número de unidades RAFA (en paralelo)	-	02 und
Largo de RAFA	L	9.20 m
Ancho de RAFA	A	6.10 m
Altura total	H	7.20 m
Borde libre	-	0.60 m
Cantidad de puntos de alimentación	Nd	28
Ancho de colector de gas	-	0.50 m
Ancho de base de campana	2Ac	5.55 m
Altura de campana	h1	2.70 m
Altura de zona de lodos	h2	4.50 m
Abertura entre campana y deflector	Anab	0.40 m
Remoción de contaminantes		
Eficiencia de remoción de DBO	R_{DBO}	77 %
Eficiencia de remoción de DQO	R_{DQO}	85.1 %

La forma de esta unidad, se muestra en la figura 34:

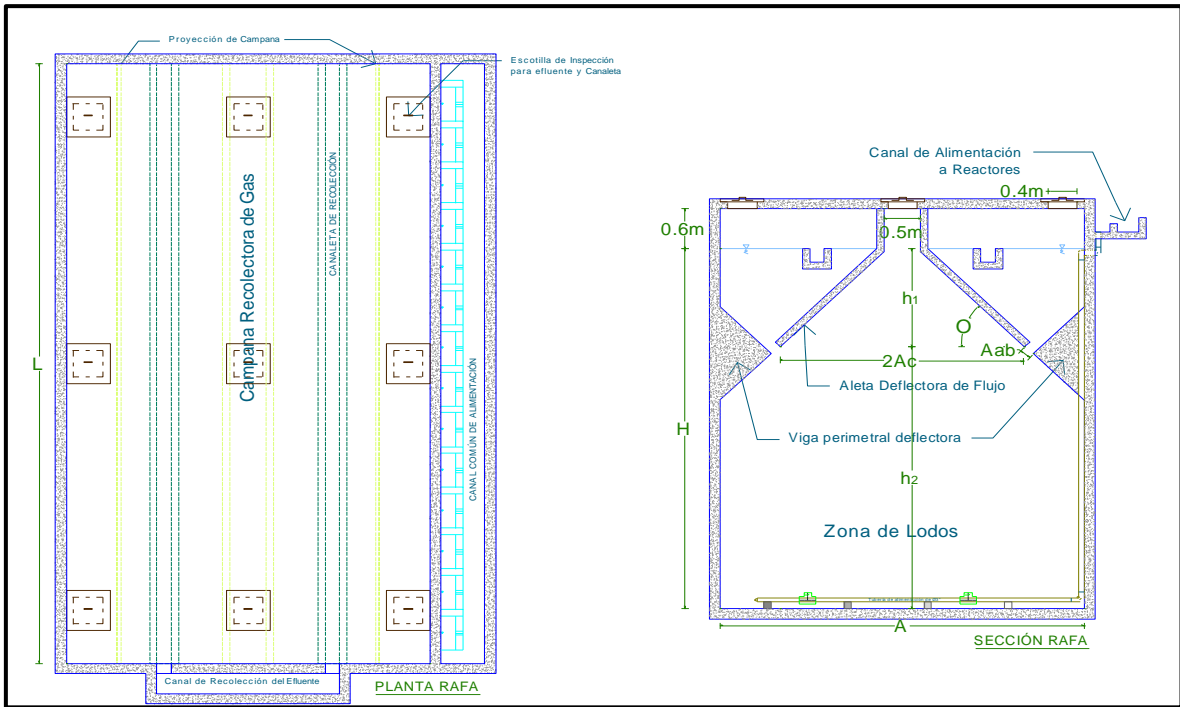


Figura 34. Forma de RAFA

Filtros anaeróbicos de flujo ascendente (FAFA)

Los resultados del diseño de estas unidades, se muestran en la tabla 53:

Tabla 53. Dimensiones de FAFA

Detalle	Variable	Dimensión
Número de FAFA (en paralelo)	-	02 und
Largo de FAFA	L	18.60 m
Ancho de FAFA	A	9.30 m
Altura de medio filtrante	H_f	2.90 m
Borde libre	-	0.50 m
Pendiente de fondo (canal de lodos)	S	5%
Remoción de contaminantes		
Eficiencia de remoción de DBO	R_{DBO}	77.55 %

La forma de estas unidades se muestra en las figuras 35 y 36:

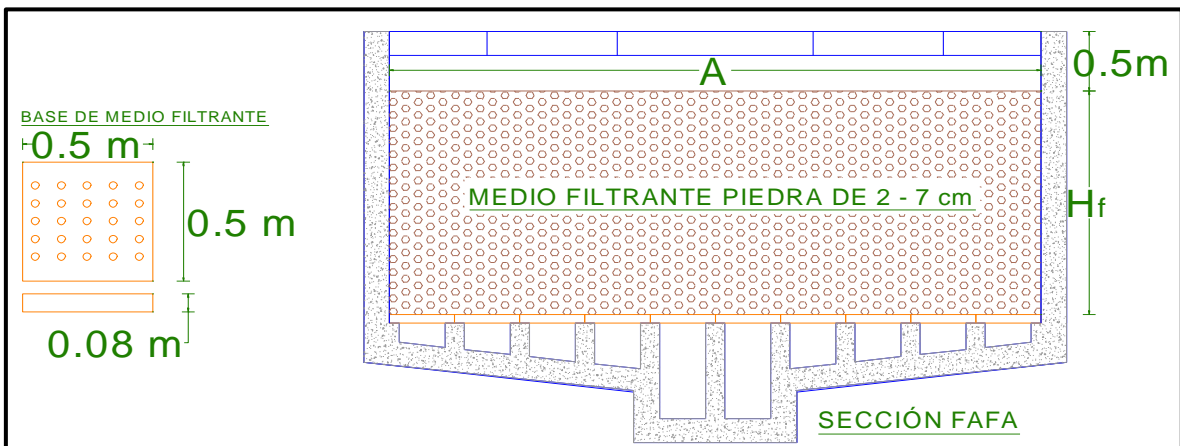


Figura 35. Sección transversal de FAFA y detalle de base de medio filtrante

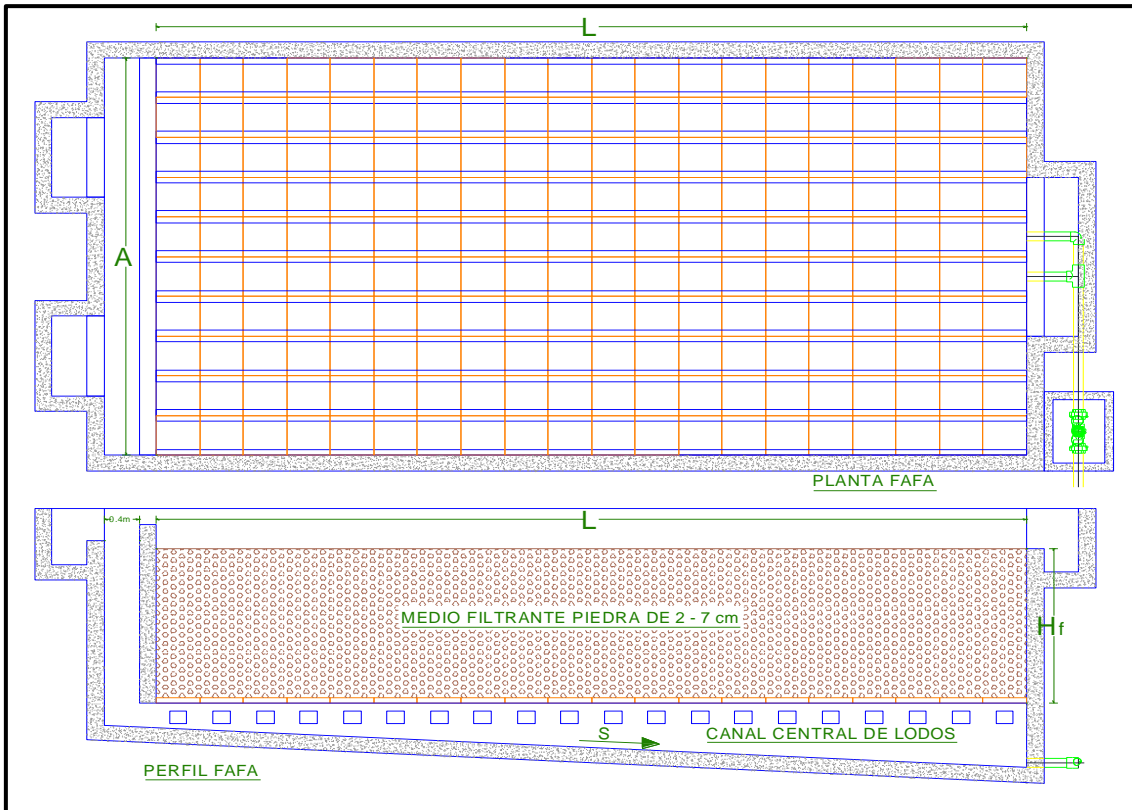


Figura 36. Planta y perfil de FAFA

E) Unidades de tratamiento terciario

Lagunas de maduración

Los resultados del diseño de estas unidades, se muestran en la tabla 54:

Tabla 54. Dimensiones de laguna de maduración

Detalle	Variable	Dimensión
Número lagunas (en paralelo)	-	02 und
Largo superior de laguna de maduración	Ls	67.80 m
Largo inferior de laguna de maduración	Li	64.20 m
Ancho superior de laguna de maduración	As	34.80 m
Ancho inferior de laguna de maduración	Ai	31.20 m
Altura de laguna de maduración	H	1.20 m
Borde libre	-	0.50 m
Talud de terraplén	Z	1.5
Remoción de contaminantes		
Eficiencia de remoción de DBO	R _{DBO}	72 %
Eficiencia de remoción de CF	R _{CF}	82 %

La forma de estas lagunas se muestra en la figura 37:

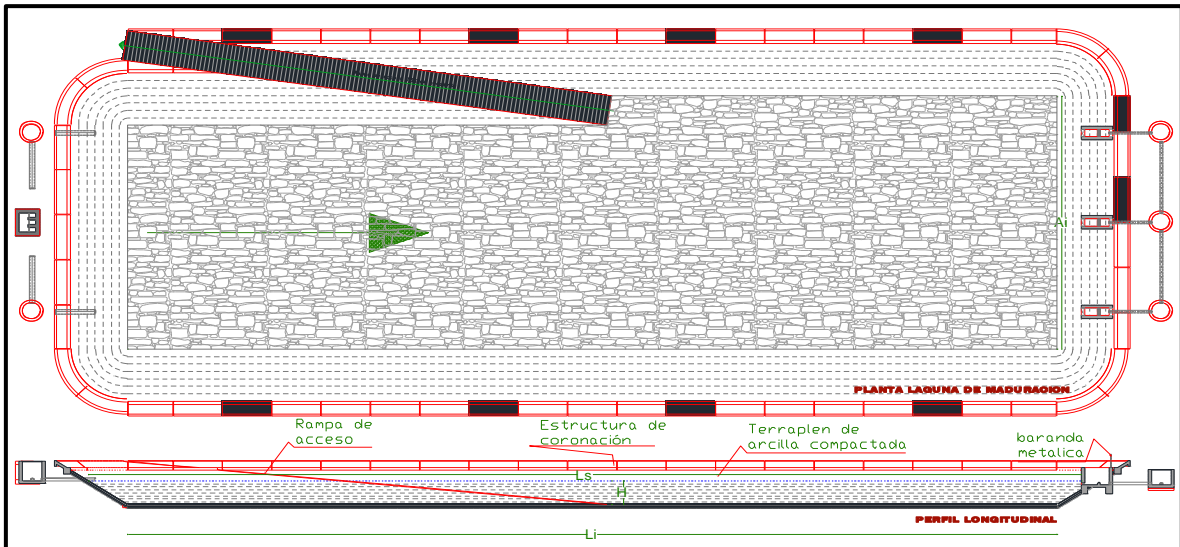


Figura 37. Forma de laguna de maduración

F) Tratamiento de lodos

Digestores de lodos

Los resultados del diseño de estas unidades, se muestran en la tabla 55:

Tabla 55. Dimensiones de digestor de lodos

Detalle	Variable	Dimensión
Número digestores de lodos (en paralelo)	-	02 und
Diámetro de digestor de lodos	D	2.80 m
Profundidad de digestor de lodos	H	5.00 m
Borde libre	-	0.60 m
Talud de fondo	Z	4

La forma de estas unidades se muestra en la figura 38:

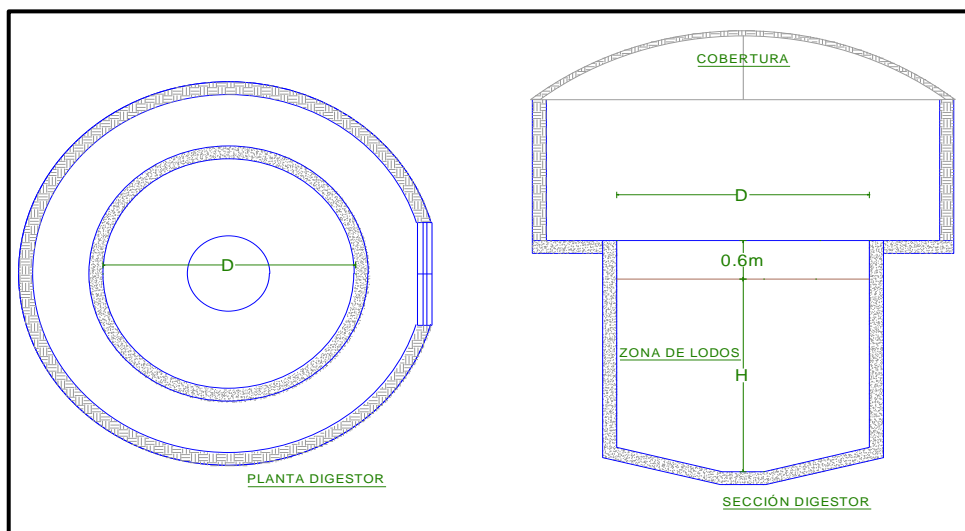


Figura 38. Forma de un digestor de lodos circular

Estas unidades también se pueden construir en forma de cuadrados o rectangulares, queda a criterio del proyectista.

Lechos de secado de lodos

El resultado del diseño de estas unidades, se muestran en la tabla 56:

Tabla 56. Dimensiones de lecho de secado de lodos

Detalle	Variable	Dimensión
Número lechos de secado (en paralelo)	-	01 und
Lado de lecho de secado	L	28.50 m
Altura útil de lecho de secado	H	0.50 m
Borde libre	-	0.50 m
Altura de medio filtrante y su soporte	h_1	0.55 m
Pendiente fondo hacia el drenaje	S1	1%
Pendiente de tubería de drenaje	S2	1.5%

La forma de estas unidades se muestra en la figura 39:

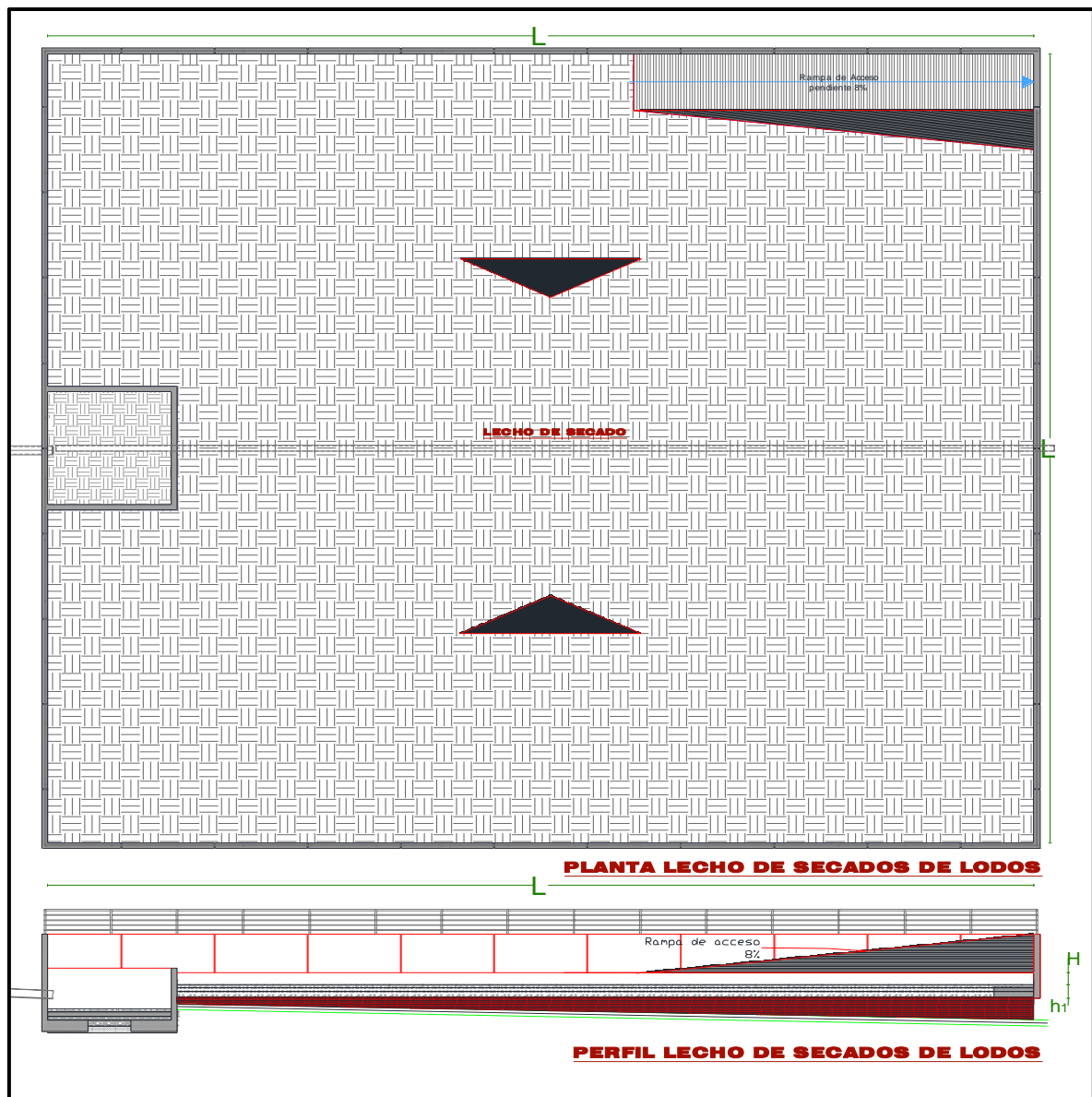


Figura 39. Forma de lecho de secado de lodos

V. DISCUSIÓN

En la mayoría de los proyectos de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, los criterios adoptados para su diseño son de una sola norma, en algunos casos no cuentan con el sustento de alguna norma, por lo general los proyectistas optan por usar hojas de cálculo que se encuentran en internet, y lo más preocupante es que cuando estas plantas construidas entran en funcionamiento, no cumplen con su objetivo tal y como se ha planteado y esto acarrea sobrecostos en la etapa de operación y mantenimiento.

Los profesionales que se dedican al diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales, no cuentan con un adecuado entendimiento de los criterios de diseño que establecen las normas nacionales y mucho menos las que establecen las normas internacionales. A causa de ello se tiene un deficiente funcionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales tal y como lo muestra el diagnóstico realizado por la (SUNASS, 2015).

Otro factor importante en cuanto al costo de construcción, es la deficiente distribución de algunas unidades de tratamiento, como ejemplo, me menciona el uso de bypass en cámara de rejas en la etapa de pretratamiento, cuando se había considerado dos de estas unidades en paralelo, por lo tanto, el bypass no cumplirá ninguna función. Otro error típico que he encontrado es que, consideran dos tanques Imhoff en paralelo, cuando solo es necesario la construcción de uno, ya que el mantenimiento que se le da a estas unidades es de cada 6 meses y además el mantenimiento no interrumpe su funcionamiento. Estos errores comunes pueden ser evitados con una correcta aplicación de los criterios que establecen las normas, si además de las normas nacionales se revisan otras normas, se mejora y amplía el conocimiento del funcionamiento de las diferentes tecnologías que existen en un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Para mejorar esta situación en cuanto al diseño de PTAR, esta investigación ha establecido parámetros de diseño para unidades de tratamiento más comunes y usados en nuestro medio por etapas de tratamiento, tomando en cuenta cuatro normas latinoamericanas.

VI. CONCLUSIONES

Conclusión general:

Con los procesos de diseño hidráulico propuestos de plantas de tratamiento de aguas residuales por componentes considerando las normas revisadas, se optimiza las plantas tanto en funcionamiento y en la manera de diseñarlas, si se considera los parámetros tal y como se propone.

Conclusión específico 1:

En cuanto a los métodos de diseño, se ha definido un proceso para cada componente y por etapas a partir de la comparativa de criterios de las normas revisadas, donde el criterio o parámetro adoptado es el que mayor semejanza tenía entre todas las normas, es decir por mayoría simple. Con esto tanto el diseño como el funcionamiento de cada unidad se optimizan, ya que las normas revisadas son documentos validados por diferentes expertos en la materia.

Conclusión específico 2:

La situación de conformar posibles combinaciones de tecnologías o unidades de tratamiento, siempre quedará a criterio del que realiza el diseño de las plantas de tratamiento, sin embargo, se ha propuesto un método sencillo para definir el tipo de sistema de tratamiento, así como posibles combinaciones de tecnologías existentes actualmente.

Conclusión específico 3:

La eficiencia de un sistema de tratamiento, depende de la elección de tecnologías o unidades que la componen, para el que se debe tener en cuenta el nivel de remoción de contaminantes que se desea alcanzar, en ese sentido, en este trabajo se ha contemplado la eficiencia de remoción de contaminantes de las diferentes combinaciones de unidades y con ello el que realice los diseños podrán elegir el más conveniente de acuerdo a la realidad de la localidad del proyecto.

VII. RECOMENDACIONES

A los profesionales que deseen realizar el diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales, tengan en cuenta los procedimientos planteados y propuestos en este trabajo, aclarando que, las decisiones finales sobre el diseño que realice serán bajo su criterio, para ello es necesario que tengan iniciativa de ampliar sus conocimientos ya sea revisando otras normas adicionales y/o teorías relacionadas.

Por otro lado, cabe resaltar que, muchas fórmulas que verán en este trabajo, no se les hará familiares ya que éstas han sido deducidas y sugeridas por el autor. Por lo tanto, se recomienda a los diseñadores de plantas o proyectistas que, revisen detenidamente estas fórmulas y tengan siempre en cuenta las unidades de medida de los datos a usarse, está de más señalar que para una correcta aplicación de cualquier fórmula se debe buscar la uniformidad de sus unidades de medida.

Asimismo, en cuanto al procesamiento de datos básicos, que son necesarios para inicial el diseño de una planta de tratamiento, tales como la población, los caudales de diseño y las características del afluente; se recomienda al proyectista que, realice un estudio minucioso y detallado en la localidad para el que realizará el diseño. De no ser posible la realización de los estudios básicos requeridos, las normas siempre tendrán unos valores referenciales para la obtención de los datos necesarios, sin embargo, hay que tener en cuenta que las normas solo admiten el uso de los valores referenciales, en caso de que la población a atender es mediana o pequeña.

Finalmente, se sugiere también a los proyectistas, un estudio topográfico detallado de la zona donde será ubicado la planta a diseñar, ya que para su buen funcionamiento de debe tener en cuenta los niveles del ingreso y salida de las aguas en cada unidad diseñada. Asimismo, es recomendable conocer el punto de entrega de las aguas tratadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDINA. 2021. ANDINA Agencia Peruana de Noticias. ANDINA Agencia Peruana de Noticias. [En línea] Editora Perú, 19 de abril de 2021. [Citado el: 12 de mayo de 2021.] <https://bit.ly/3yVc1f3>.

Ayala Durán, Carlos Antonio y Diaz Castillo, Elí. 2008. Manual para el diseño de unidades de tipo biológico en plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas en El Salvador - Tesis (Ingeniero Civil). San Salvador - El Salvador : Universidad De El Salvador, 2008.

Blogger. 2019. Blogger.com. Blogger.com. [En línea] Blogger, 11 de marzo de 2019. [Citado el: 29 de mayo de 2021.] <https://filtropercolador.blogspot.com/2019/03/1.html>.

Casanova Álvarez, Jean Louis y Huamaní Contreras, Katherine Adelina. 2014. Diseño de una planta de tratamiento para los efluentes líquidos domésticos del Distrito de Chancay. CALLAO - PERÚ : Universidad Nacional del Callao, 2014.

Cegarra Sánchez, José. 2004. Metodología de la investigación científica y tecnológica. Madrid - España : Ediciones Días de Santos, 2004. ISBN: 84-7978-624-8.

Cisterna Osorio, Pedro y Peña, Daisy. 2012. Determinación de la relación DBO/DBO5 en aguas residuales de comuna con población menor a 25,000 habitantes en la VIII región. Madrid - España : Essbio S.A. y Universidad Tec. Fec Sta NAría, 2012.

Congreso de la república - Perú. 2009. Ley de recursos hídricos - Ley N° 29339. Ley de recursos hídricos. Lima - Perú : Diario oficial El Peruano, 2009.

Contreras, Mario. 2015. Educapuntos . Educapuntos . [En línea] Educapuntos, 17 de marzo de 2015. [Citado el: 12 de junio de 2021.] <https://bit.ly/3qVrEQV>.

Conzález Manosalva, José Luis, Mejía Ruíz, Roberto y Molina Pérez, Francisco. 2012. Diseño conceptual de una estación experimental de tratamiento de aguas residuales domésticas orientada a municipios con población menor a 30,000 habitantes. Medellin - Colombia : Revista Ingenierías Universidad de Medellin, 2012. págs. 87-100. Vol. 11. ISSN 1692 - 3324.

Cristiancho Bello, Angie Julieth y Noy Ortiz, Andrés Mauricio. 2016. Diseño conceptual de una planta de tratamiento de aguas residuales para Pelikan Colombia S.A.S. BOGOTÁ D.C. - COLOMBIA : FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA, 2016.

Crites, Ronald W., Middlebrooks, Joe y Reed, Sherwood C. 2006. Natural wastewater treatment systems. New York - EE. UU. : Taylor & Francis Group, 2006. ISBN-10: 0-8493-3804-2.

DIGESBA - NB 688. 2001. Norma Boliviana NB 688 - Norma técnica de diseño para sistemas de alcantarillado y tratamiento de aguas residuales. La Paz - Bolivia : Génesis Publicidad e Impresión, 2001.

Estruagua. 2019. Estruagua technology for life. Estruagua technology for life. [En línea] Estruagua, 01 de enero de 2019. [Citado el: 14 de mayo de 2021.] <https://bit.ly/3wM35Y4>.

Farias de Marquez, Bettys. 2016. Iagua. Iagua. [En línea] Iagua, 19 de setiembre de 2016. [Citado el: 18 de mayo de 2021.] <https://bit.ly/3B3rKud>.

GeneratePress. 2021. Tratamiento de aguas residuales. Tratamiento de aguas residuales. [En línea] GeneratePress, 01 de enero de 2021. [Citado el: 18 de mayo de 2021.] <https://bit.ly/3ejli8H>.

González Manosalva, José Luis, Mejía Ruiz, Roberto y Molina Pérez, Francisco. 2012. Diseño conceptual de una estación experimental de tratamiento de aguas residuales domésticas orientada a municipios con población menor a 30,000 habitantes. Medellín - Colombia : Revista Ingeniería Universidad de Medellín, 2012. págs. 87-99. Vol. 11. ISSN 1692-3324.

Hernández Sampieri, Roberto, Fernández Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. 2014. Metodología de la investigación. 6ta. México : McGraw-Hill Interamericana, 2014. ISBN: 978-1-4562-2396-0.

Hernandez, A. 1992. Depuración de aguas residuales. Madrid : Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1992.

HIDROWARE. 2019. HIDROWARE. HIDROWARE.COM. [En línea] 2019. <https://hydrowareweb.com/>.

López Vázquez, Carlos M., y otros. 2017. Tratamiento biológico de aguas residuales: Principios, modelación y diseño. Londres : IWA publishing, 2017. ISBN: 9781780409245.

MAPAS N° 25. 2015. MAPAS Introducción al tratamiento de aguas residuales municipales. México : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 26. 2015. MAPAS Diseño de PTARM pretratamiento y tratamiento primario. México : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 27. 2015. MAPAS diseño de PTARM lagunas de estabilización. Mexico : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 28. 2015. MAPAS - Diseño de PTARM - Reactores anaerobios de flujo ascendente. Mexico : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 34. 2015. MAPAS Diseño de PTARM Proceso de Oxidación Bioquímica con Biomasa Fija. Mexico : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 38. 2015. MAPAS Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales para la recarga artificial de acuíferos. México : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 29. 2015. MAPAS - Diseño de PTARM - Filtros anaeróbicos de flujo ascendente. México : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

MAPAS N° 30. 2015. MAPAS - Diseño de PTARM - Humedales artificiales. México : GOBIERNO DE MÉXICO, SEMANART y CONAGUA, 2015.

OPS y CEPIS 158. 2005. Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores. Lima - Perú : UNATSABAR, 2005.

OPS y CEPIS 163. 2005. Guía para el diseño de tanques sépticos, tanques Imhoff y lagunas de estabilización. Lima : UNATSABAR, 2005.

Quiroz Pedraza, Pedro Alexis. 2009. Planta de tratamiento de aguas residuales para riego en la universidad nacional mayor de san marcos. LIMA - PERÚ : Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2009.

Raffino, Maria Estela. 2021. concepto.de. concepto.de. [En línea] etecé, 16 de julio de 2021. [Citado el: 19 de julio de 2021.] <https://concepto.de/cuadro-comparativo/>.

Ramalho, Reubens Sette. 2003. Tratamiento de aguas residuales. Barcelona - España : Editorial Reverté S.A., 2003.

RAS Título - A. 2000. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, Título A - Aspectos generales. Bogotá - Colombia : MinDesarrollo, 2000.

RAS Titulo - E. 2000. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS 2000, Título E - tratamiento de aguas residuales. Bogotá - Colombia : MinDesarrollo, 2000.

RNE. 2018. Reglamento Nacional De Edificaciones. Lima - Perú : Megabyte S.A.C. grupo editorial, 2018.

Rodriguez Jiménez, Andrés y Pérez Jacinto, Alipio Omar. 2017. Métodos científicos de indagación y construcción del conocimiento. Bogotá - Colombia : Revista EAN - Universidad EAN, 2017. págs. 1-26. Vol. I. ISS: 0120-8160.

Salas, Juan José. 2020. Iagua. Iagua. [En línea] Iagua, 16 de noviembre de 2020. [Citado el: 01 de junio de 2021.] <https://bit.ly/3wF9tAd>.

Sánchez Ramirez, J. E., Mejía Fajardo, A. y Amorocho Cruz, C. M. 2015. Software de ingeniería especializado en el diseño y simulacion de plantas de tratamiento de agua residual: revisión. Colombia : Revista Ingeniería y Región, 2015. págs. 57-71. ISSN 1657 - 6985.

Sepulveda M., Belquis Briceida, Sierra M., Javier Alexander y Romero R., Jairo Alberto. 2017. Guía y herramienta computacional para el diseño hidráulico de un sistema de tratamiento preliminar (cribado y desarenador) de aguas residuales. Bogotá - Colombia : Escuela Colombiana de Ingeniería "Julio Garavito", 2017.

SUNASS. 2015. Diagnóstico de las plantas de tratamiento de aguas residuales en el ámbito de operación de las entidades prestadoras de servicios de saneamiento. Lima - Perú : Dirk Loose, 2015.

V.S.B. Bolivia. 2005. Guía técnica de diseño de proyectos de saneamiento para poblaciones menores a 10000 habitantes. La Paz - Bolivia : HYTSA Estudios y Proyectos, 2005.

Valencia López, Adriana Elizabeth. 2013. Diseño de un sistema de tratamiento para las aguas residuales de la cabecera parroquial de San Luis - Provincia de Chimborazo. RIOBAMBA - ECUADOR : ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, 2013.

Wagner, Wolfgang. 2010. Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia. La Paz - Bolivia : ANESAPA - PROAPAC, 2010.

Yáñez, F. 1993. Lagunas de estabilización. Teoría, diseño, evaluación y mantenimiento. Cuenca - Ecuador : Empresa Pública Municipal de Teléfonos, Agua Potable y Alcantarillado de Cuenca, 1993.

ANEXOS:

Anexo 01: Matriz de consistencia

Título : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales

AUTOR : CANAZA CAÑAZACA, Willi Ivan

PROBLEMA	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIÓN	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><u>GENERAL</u> ¿Cómo los criterios comparativos de diseño hidráulico basado en normas nacionales e internacionales optimizarían las plantas de tratamiento de aguas residuales?</p>	<p><u>GENERAL</u> Optimización de plantas de tratamiento de aguas residuales comparando criterios de diseño hidráulico de normas nacionales e internacionales.</p>	<p><u>VI</u> Criterios comparativos</p> <p><u>VD</u> Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales</p>	<p>Capacidad cognoscitiva</p> <p>Sistemas</p>	<p>Parámetros de diseño</p> <p>Componentes</p>	<p><u>MÉTODO DE INVESTIGACIÓN</u> Lógico deductivo</p> <p><u>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</u> M => O</p> <p><u>TIPO DE INVESTIGACIÓN</u> Aplicada</p> <p><u>NIVEL DE INVESTIGACIÓN</u> Exploratorio y descriptivo</p> <p><u>POBLACIÓN</u> Normas nacionales e internacionales</p> <p><u>MUESTRA</u> RNE (PERÚ), RAS (COLOMBIA), MAPAS (MÉXICO) y NB 688-01 (BOLIVIA)</p> <p><u>MUESTREO</u> Dirigida no probabilístico</p> <p><u>DELIMITACIONES</u> Sin delimitación espacial Temporalmente 04 meses de investigación (abril a julio del 2021) Procedimientos propuestos de diseño PTAR con tecnologías que no necesitan intervención mecánica para poblaciones de 1000 hasta 30000 habitantes</p>
<p><u>ESPECÍFICO 01</u> ¿Con la clasificación de parámetros adecuados se definiría el método adecuado de diseño de una PTAR utilizando los criterios comparativos de diseño hidráulico?</p>	<p><u>ESPECÍFICO 01</u> Definir el método adecuado de diseño de una PTAR clasificado parámetros, utilizando los criterios comparativos de diseño hidráulico.</p>				
<p><u>ESPECÍFICO 02</u> ¿Con el diseño de cada componente se conformaría posibles combinaciones de tecnologías de tratamiento de aguas residuales aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico?</p>	<p><u>ESPECÍFICO 02</u> Conformar posibles combinaciones de tecnologías de tratamiento de aguas residuales diseñando cada componente, aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico.</p>				
<p><u>ESPECÍFICO 03</u> ¿Con una correcta elección de los componentes de una PTAR se definiría sistemas eficientes de tratamiento aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico?</p>	<p><u>ESPECÍFICOS 03</u> Definir sistemas eficientes de tratamiento con una correcta elección de componentes, aplicando los criterios comparativos de diseño hidráulico.</p>				

Anexo: 02

Evaluación de validez y confiabilidad

Cálculo de coeficiente de confiabilidad (basado en Anexo 03)

Nº DE EXPERTO	ÍTEMS											SUMA
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
E1	5	5	5	5	4	4	5	5	4	5	4	51
E2	5	5	4	5	4	3	4	4	4	4	4	46
E3	5	5	4	5	5	4	4	5	5	5	5	52
VARIANZA	0.000	0.000	0.222	0.000	0.222	0.222	0.222	0.222	0.222	0.222	0.222	6.88889
SUMATORIA DE VARIANZAS	1.778											

$$\alpha = \frac{K}{K-1} * \left(1 - \frac{\sum S_i^2}{S_T^2}\right) = \frac{11}{11-1} * \left(1 - \frac{1.788}{6.889}\right) \rightarrow \alpha = 0.78$$

Dónde:

K : Número de ítems

$\sum S_i^2$: Sumatoria de varianzas de cada ítem

S_T^2 : Varianza total del instrumento

α : Alfa de Cronbach (coeficiente de confiabilidad)

Cálculo de índice de validez (basado en Anexo 04)

ÍTEM	Redacción				Claridad				Lenguaje				Entendimiento				Cumplimiento de objetivos			
	E1	E2	E3	Acuerdo	E1	E2	E3	Acuerdo	E1	E2	E3	Acuerdo	E1	E2	E3	Acuerdo	E1	E2	E3	Acuerdo
1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1
7	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1
8	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Validez		1.000		Validez		0.818		Validez		0.727		Validez		0.636		Validez		1.000	
Validez Total = 0.84																				

- La validez individual la relación entre la suma de los acuerdos y el número de ítems.
- La validez total se obtiene como el promedio de las valideces individuales.
- E1, E2 y E3, hacen referencia a los expertos que revisaron la investigación

Anexo 03:

Formato de confiabilidad de instrumentos

Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

De acuerdo a su percepción, usted vea por conveniente:

Percepción	Valor
Totalmente de acuerdo	5
De acuerdo	4
Indeciso	3
En desacuerdo	2
Totalmente en desacuerdo	1

A continuación, marque con una (X) dentro del recuadro del valor que vea por conveniente en cada ítem:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR (Cronbach)				
		1	2	3	4	5
1	Las normas revisadas son relacionadas al tema de investigación					
2	Las teorías usadas refuerzan a las normas en el desarrollo de la investigación.					
3	Las formas de seleccionar un sistema de tratamiento son adecuadas.					
4	Los cuadros comparativos de criterios según normas son relevantes para los diseños.					
5	Los cuadros comparativos de criterios según normas contienen datos verídicos según su fuente.					
6	Los cuadros comparativos de criterios según normas mejoran la noción en el proceso de diseño.					
7	Los procesos de diseño propuestos son considerados coherentes y apropiados.					
8	Las fórmulas usadas y propuestas en los procesos de diseño son coherentes y fáciles de aplicar.					
9	Los criterios considerados en los procesos son coherentes con las normas revisadas					
10	Los resultados que se obtienen al diseñar con los procesos propuestos son adecuados y aceptables.					
11	Al diseñar las unidades con los procesos propuestos optimiza las plantas de tratamiento de aguas residuales.					

Revisión:

Experto N°:		
Validado por:		
Profesión:		
Colegiatura:		

Anexo 03:

Formato de confiabilidad de instrumentos

Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan


De acuerdo a su percepción, usted vea por conveniente:

Percepción	Valor
Totalmente de acuerdo	5
De acuerdo	4
Indeciso	3
En desacuerdo	2
Totalmente en desacuerdo	1

A continuación, marque con una (X) dentro del recuadro del valor que vea por conveniente en cada ítem:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR (Cronbach)				
		1	2	3	4	5
1	Las normas revisadas son relacionadas al tema de investigación					X
2	Las teorías usadas refuerzan a las normas en el desarrollo de la investigación.					X
3	Las formas de seleccionar un sistema de tratamiento son adecuadas.					X
4	Los cuadros comparativos de criterios según normas son relevantes para los diseños.					X
5	Los cuadros comparativos de criterios según normas contienen datos verídicos según su fuente.				X	
6	Los cuadros comparativos de criterios según normas mejoran la noción en el proceso de diseño				X	
7	Los procesos de diseño propuestos son considerados coherentes y apropiados					X
8	Las fórmulas usadas y propuestas en los procesos de diseño son coherentes y fáciles de aplicar.					X
9	Los criterios considerados en los procesos son coherentes con las normas revisadas				X	
10	Los resultados que se obtienen al diseñar con los procesos propuestos son adecuados y aceptables.					X
11	Al diseñar las unidades con los procesos propuestos optimiza las plantas de tratamiento de aguas residuales.				X	

Revisión:

Experto N°:	01	 Wilber Condori Pinto INGENIERO CIVIL CIP. 152457
Validado por:	Wilber Condori Pinto	
Profesión:	Ingeniero Civil	
Colegiatura:	CIP. 152457	

Anexo 03:

Formato de confiabilidad de instrumentos

Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

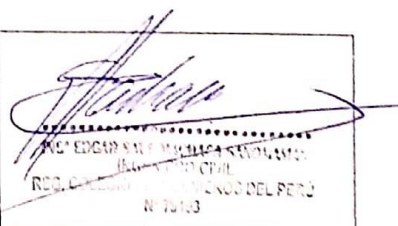
De acuerdo a su percepción, usted vea por conveniente:

Percepción	Valor
Totalmente de acuerdo	5
De acuerdo	4
Indeciso	3
En desacuerdo	2
Totalmente en desacuerdo	1

A continuación, marque con una (X) dentro del recuadro del valor que vea por conveniente en cada ítem:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR (Cronbach)				
		1	2	3	4	5
1	Las normas revisadas son relacionadas al tema de investigación					X
2	Las teorías usadas refuerzan a las normas en el desarrollo de la investigación.					X
3	Las formas de seleccionar un sistema de tratamiento son adecuadas.				X	
4	Los cuadros comparativos de criterios según normas son relevantes para los diseños.					X
5	Los cuadros comparativos de criterios según normas contienen datos verídicos según su fuente.				X	
6	Los cuadros comparativos de criterios según normas mejoran la noción en el proceso de diseño.			X		
7	Los procesos de diseño propuestos son considerados coherentes y apropiados.				X	
8	Las fórmulas usadas y propuestas en los procesos de diseño son coherentes y fáciles de aplicar.				X	
9	Los criterios considerados en los procesos son coherentes con las normas revisadas				X	
10	Los resultados que se obtienen al diseñar con los procesos propuestos son adecuados y aceptables.				X	
11	Al diseñar las unidades con los procesos propuestos optimiza las plantas de tratamiento de aguas residuales.				X	

Revisión:

Experto N°:	02	 <p>ING. EDGAR SAUL MACHACA SANOMAMANI INGENIERO CIVIL REG. COLEGIADO EN INGENIEROS DEL PERU N° 79193</p>
Validado por:	Edgar Saul Machaca Sanomamani	
Profesión:	Ingeniero Civil	
Colegiatura:	CIP. 79193	

Anexo 03:

Formato de confiabilidad de instrumentos

Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

De acuerdo a su percepción, usted vea por conveniente:

Percepción	Valor
Totalmente de acuerdo	5
De acuerdo	4
Indeciso	3
En desacuerdo	2
Totalmente en desacuerdo	1

A continuación, marque con una (X) dentro del recuadro del valor que vea por conveniente en cada ítem:

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	VALOR (Cronbach)				
		1	2	3	4	5
1	Las normas revisadas son relacionadas al tema de investigación					X
2	Las teorías usadas refuerzan a las normas en el desarrollo de la investigación.					X
3	Las formas de seleccionar un sistema de tratamiento son adecuadas.				X	
4	Los cuadros comparativos de criterios según normas son relevantes para los diseños.					X
5	Los cuadros comparativos de criterios según normas contienen datos verídicos según su fuente.					X
6	Los cuadros comparativos de criterios según normas mejoran la noción en el proceso de diseño.				X	
7	Los procesos de diseño propuestos son considerados coherentes y apropiados.				X	
8	Las fórmulas usadas y propuestas en los procesos de diseño son coherentes y fáciles de aplicar.					X
9	Los criterios considerados en los procesos son coherentes con las normas revisadas					X
10	Los resultados que se obtienen al diseñar con los procesos propuestos son adecuados y aceptables.					X
11	Al diseñar las unidades con los procesos propuestos optimiza las plantas de tratamiento de aguas residuales.					X

Revisión:

Experto N°:	03	
Validado por:	Jorge Manuel Muñoz Yensen	
Profesión:	Ingeniero Civil	
Colegiatura:	CIP. 58474	

Anexo 04:

Formato de validez de los instrumentos

Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

A partir del anexo 03, evalúe la validez de los instrumentos en cada ítem:

ÍTEM	Redacción		Claridad		Lenguaje		Entendimiento		Cumplimiento de objetivos		Observaciones
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
1											
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											

Revisión:

Experto N°:		
Validado por:		
Profesión:		
Colegiatura:		

Anexo 04:

Formato de validez de los instrumentos


Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

A partir del anexo 03, evalúe la validez de los instrumentos en cada ítem:

ÍTEM	Redacción		Claridad		Lenguaje		Entendimiento		Cumplimiento de objetivos		Observaciones
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
1	X		X		X		X		X		
2	X		X		X		X		X		
3	X		X		X		X		X		
4	X		X		X		X		X		
5	X		X		X		X		X		
6	X		X		X		X		X		
7	X			X		X		X	X		
8	X			X		X		X	X		
9	X		X		X		X		X		
10	X		X			X		X	X		
11	X		X		X		X		X		

Revisión:

Experto N°:	01	 Wilber Condori Pinto INGENIERO CIVIL CIP. 152457
Validado por:	<i>Wilber Condori Pinto</i>	
Profesión:	<i>Ingeniero Civil</i>	
Colegiatura:	<i>CIP. 152457</i>	

Anexo 04:

Formato de validez de los instrumentos

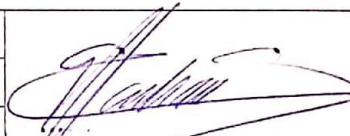
Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

A partir del anexo 03, evalúe la validez de los instrumentos en cada ítem:

ÍTEM	Redacción		Claridad		Lenguaje		Entendimiento		Cumplimiento de objetivos		Observaciones
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
1	X			X	X			X	X		
2	X			X	X		X		X		
3	X			X	X			X	X		
4	X		X		X		X		X		
5	X		X		X		X		X		
6	X		X			X		X	X		
7	X			X		X		X	X		
8	X			X		X		X	X		
9	X		X		X		X		X		
10	X		X		X		X		X		
11	X		X		X		X		X		

Revisión:

Experto N°:	02	 <small>REG. COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERU N° 79193</small>
Validado por:	<i>Edgar Saul Machaca Sanomamani</i>	
Profesión:	<i>Ingeniero Civil</i>	
Colegiatura:	<i>CIP. 79193</i>	

Anexo 04:

Formato de validez de los instrumentos

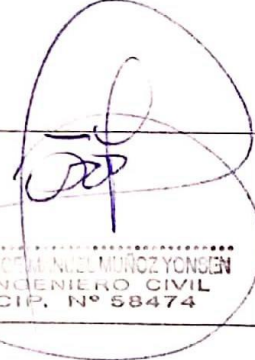
Tesis : Criterios comparativos de diseño hidráulico para optimizar plantas de tratamiento de aguas residuales basado en normas nacionales e internacionales.

Autor : CANAZA CAÑAZACA Willi Ivan

A partir del anexo 03, evalúe la validez de los instrumentos en cada ítem:

ÍTEM	Redacción		Claridad		Lenguaje		Entendimiento		Cumplimiento de objetivos		Observaciones
	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
1	X		X		X		X		X		
2	X		X			X	X		X		
3		X	X		X			X	X		
4	X		X		X		X		X		
5	X		X		X		X		X		
6	X		X			X		X	X		
7	X		X		X		X		X		
8	X		X		X		X		X		
9	X		X		X		X		X		
10	X		X		X		X		X		
11	X		X		X		X		X		

Revisión:

Experto N°:	03	 JORGE MANUEL MUÑOZ YENSEN INGENIERO CIVIL CIP. N° 58474
Validado por:	<i>Jorge Manuel Muñoz Yensen</i>	
Profesión:	<i>Ingeniero Civil</i>	
Colegiatura:	<i>CIP. 58474</i>	