

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE
HUAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
METALURGIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA



CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DE UN HIDROCICLÓN PARA LA
REMOCIÓN DE ARENAS RESIDUALES EN EL DESARENADOR EN LA
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA TOTORA” –
AYACUCHO

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTADO POR:

Bach. Herlis Sergio HUALLPA VARGAS

AYACUCHO - PERÚ

2019

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi madre Eleuteria Vargas Palomino, quien en vida fue ejemplo de honestidad y dedicación en todos los aspectos de su vida, me queda todas las enseñanzas aprendido durante momentos que estaba conmigo, con el más inmenso amor, cariño, admiración y gratitud a mi padre Sergio Huallpa Taype por el apoyo brindado, sin su ayuda este trabajo no sería ejecutado.

A mis hermanas Gardenia, Lizbeth, Ingrid y sobrinos quienes fueron motivos en este presente.

AGRADECIMIENTO

A Dios sobre todas las cosas por darme la vida y salud acompañarme en los buenos y malos momentos, testigo de este trabajo.

Mi eterno agradecimiento a la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, en especial a la Escuela Profesional de Ingeniería Química y más aún a mis docentes quienes me brindaron sus conocimientos y consejos en mi etapa de formación como profesional.

Mi sincero agradecimiento a mi asesor Ing. Cipriano Mendoza Rojas, por su confianza, y sus conocimientos brindados en el apoyo en la ejecución del presente trabajo

Al Ingeniero Alfredo Arias Jara, por su paciencia, amistad y sus múltiples correcciones y al ingeniero Alejandro Tineo Morote, por su apoyo y consejos en todo el trabajo ejecutado, al personal del taller electromecánico "Holger K. Hansen" de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia por su apoyo brindado.

A la empresa prestadora de servicios SEDA AYACUCHO, por confiar en este trabajo de investigación y facilitarme el acceso a la planta de tratamiento de aguas residuales "La Totorá".

A mi amigo Francisco Patiño Pomahuacre, por su apoyo en la evaluación de este trabajo.

Gracias en general a todos los profesores y personas que participaron directa e indirectamente en mi desarrollo profesional, sin su ayuda y conocimientos no estaría en donde me encuentro ahora, Gracias a todos.

ÍNDICE

CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE	iv
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
GLOSARIO	xviii
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1.ANTECEDENTES	1
1.1.1.A nivel Internacional	1
1.1.2.A nivel Nacional	2
1.2.PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2.1.Delimitación del problema	4
1.2.2.Formulación del problema.....	4
1.3.OBJETIVOS	5
1.4.IMPORTANCIA	5
1.5.JUSTIFICACIONES	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1.PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA TOTORA”	7
2.2.CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	10
2.2.1.Alteraciones físicas.....	10
2.3.AGUAS RESIDUALES	11
2.3.1.Clasificación de las aguas residuales.....	12
2.3.2.Niveles de tratamiento	12

2.4.DESARENADOR	13
2.4.1.Objetivos del proceso de desarenador	14
2.4.2.Tipos de desarenadores.....	15
2.4.3.Remoción de arenas residuales.....	22
2.4.4.Lavado de arenas residuales	23
2.5.HIDROCICLÓN.....	25
2.5.1.Funcionamiento de un hidrociclón	27
2.5.2.Zonas de operación de un hidrociclón.....	29
2.5.3.Patrones de Flujo	30
2.5.4.Diseño de ciclones	31
2.5.5.Sistemas de control en un hidrociclón.....	34
2.5.6.Cálculo del d50c	35
2.5.7.Eficiencia de separación de hidrociclón	38
2.5.8.Aplicaciones del hidrociclón	38
2.5.9.Clasificación del hidrociclón	39
2.6.MARCO LEGAL	41
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	42
3.1.UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y LUGAR DE TRABAJO	42
3.2.LUGAR Y PERIODO DE DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	43
3.3.UNIVERSO Y MUESTRA.....	44
3.4.IDENTIFICACIÓN DE ACTIVIDADES PROGRAMÁTICAS	45
3.5.DESCRIPCIÓN DE PASOS Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN	47
3.5.1.Caracterización de las arenas residuales.....	47
3.5.2.Evaluación de los parámetros de operación del desarenador	47
3.5.3.Diseño y construcción de los componentes del hidrociclón y su colector	48

3.5.4.Instalación del sistema de captación.....	49
3.5.5.Instalación del hidrociclón.....	49
3.5.6.Instalación de la electrobomba sumergible	50
3.5.7.Instalación del sistema de conducción	51
3.5.8.Puntos de muestreo.....	52
3.5.9.Puesta en marcha del hidrociclón	53
3.5.10.Operación y mantenimiento del hidrociclón	54
3.5.11.Técnicas de análisis de laboratorio.....	55
3.5.12.Resultados de los parámetros de evaluación	63
3.5.13.Análisis y discusión de resultados	63
CAPÍTULO IV: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	64
4.1.CRITERIOS DE DISEÑO DEL HIDROCICLÓN	64
4.2.CAUDAL DE DISEÑO para el hidrociclón.....	64
4.3.DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN HIDROCICLÓN	65
4.3.1.Forma del hidrociclón.....	65
4.3.2.Diseño del hidrociclón.....	65
4.3.3.Cubicación, dimensionamiento de los componentes	73
4.3.4.Cortes, rolado de las planchas	76
4.3.5.Esamblado de los componentes del hidrocicclón	80
4.3.6.Pruebas hidráulicas “sin carga”	81
4.3.7.Pruebas hidráulicas “con carga”	81
CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES	82
5.1.RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS ARENAS RESIDUALES	82
5.1.1.Granulometría de las arenas residuales	82
5.1.2.Caracterización física de las arenas residuales	84

5.1.3.Caracterización química	86
5.2.PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL CANAL DEL DESARENADOR ACTUAL	87
5.2.1.Velocidad longitudinal en el canal de desarenador	87
5.2.2.Velocidad de sedimentación de las arenas residuales	90
5.2.3.Tiempo de retención de las arenas residuales.....	91
5.2.4.Acumulación de arenas residuales en el desarenador.....	92
5.3.EVALUACIÓN DEL HIDROCICLÓN.....	98
5.3.1.Resumen de resultados experimentales	125
5.3.2.Determinación de parámetros óptimos del hidrociclón.....	126
5.3.3.Determinación de turbiedad.....	126
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	128
6.1.GRANULOMETRÍA	128
6.2.CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	129
6.3.CARACTERÍSTICA QUÍMICA	130
6.3.1.Determinación de la materia orgánica	130
6.4.PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL CANAL DEL DESARENADOR.....	130
6.4.1.Velocidad longitudinal con técnica de sin aforo.	131
6.4.2.Comportamiento de la velocidad longitudinal en función al área y caudal.....	131
6.4.3.Comportamiento de la velocidad de sedimentación de las arenas.....	132
6.4.4.Comportamiento del tiempo de retención de las arenas residuales	133
6.4.5.Comportamiento de sólidos totales y arenas acumulados	135
6.5.PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL HIDROCICLÓN.....	137
6.5.1.Remoción de sólidos con hidrociclón.....	137
6.5.2.Caudal y tiempo de retención hidráulico	138
6.5.3.Comportamiento de turbiedad	140

CONCLUSIONES.....	142
RECOMENDACIONES	144
BIBLIOGRAFÍA	145
ANEXOS.....	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá”	8
Figura 2. Aguas residuales	11
Figura 3. Desarenadores horizontales	15
Figura 4. Esquema de un desarenador de flujo horizontal	16
Figura 5. Desarenador aireado.....	18
Figura 6. Desarenador de vórtice.....	21
Figura 7. Desarenadores de vórtice a) Sistema PIST b) Sistema Teacup.	21
Figura 8. Lavado con tornillo inclinado.	25
Figura 9. Hidrociclón.	26
Figura 10. Hidrociclón y su partes	27
Figura 11. Tipos de ingreso al hidrociclón.....	28
Figura 12. Diagrama de zonas de influencia de un hidrociclón.	30
Figura 13. Dimensiones del ciclón	34
Figura 14. Arreglo multiciclón.	40
Figura 15. Ubicación geográfica del lugar de la investigación	43
Figura 16. Ubicación de la instalación del equipo de hidrociclón	44
Figura 17. Estructura de desarrollo experimental de la investigación.....	46
Figura 18. Instalación de la electrobomba sumergible.....	51
Figura 19. Toma de muestras	63
Figura 20. Configuración física del hidrociclón (Echeverri,2006)	66
Figura 21. Diseño del hidrociclón ensamblado con el colector de arena	69
Figura 22. Diseño de la estructura del hidrociclón.....	72
Figura 23. Diseño de la estructura del colector de arena.....	73
Figura 24. Representación de la parte cónica del hidrociclón.....	74
Figura 25. Representación del colector de arena.....	75
Figura 26. Representación en plantillas del cono del hidrociclón.....	76
Figura 27. Forma del cono del hidrociclón en plantilla	76
Figura 28. Componente de entrada tangencial del hidrociclón representada en plantilla	77
Figura 29. Construcción del hidrociclón	78
Figura 30. Construcción del módulo para el soporte del hidrociclón.....	79

Figura 31. Construcción del módulo para el soporte de la electrobomba	80
Figura 32. Ensamblado de los componentes del hidrociclón	80
Figura 33. Prueba hidráulica con carga	81
Figura 34. Determinación de tamaños de arenas	83
Figura 35. Determinación de la gravedad específica.....	84
Figura 36. Determinación de la materia orgánica en las arenas	86
Figura 37. Determinación de la velocidad longitudinal con la técnica de sin aforo.	88
Figura 38. Determinación de sólidos sedimentables con Conos Imhoff	93
Figura 39. Determinación de sólidos totales	94
Figura 40. Determinación de arena pura de materia orgánica.....	96
Figura 41. Instalación del sistema de captación	98
Figura 42. Instalación del modulo	99
Figura 43. Instalación del hidrociclón	99
Figura 44. Construcción del pozo a tierra	100
Figura 45. Instalación del sistema de conducción	101
Figura 46. Puntos de muestreo	101
Figura 47. Puntos de muestreo antes del ingreso al hidrociclón	102
Figura 48. Puntos de muestreo a la salida superior del hidrociclón	103
Figura 49. Puntos de muestreo a la salida inferior del hidrociclón	103
Figura 50. Frascos con muestras	104
Figura 51. Medición del caudal de ingreso	104
Figura 52. Presión de ingreso	105
Figura 53. Mantenimiento de la estructura de la electrobomba sumergible.....	106
Figura 54. Representación esquemática del balance de materia para $F= 6,3466 \text{ L/s}$	108
Figura 55. Representación esquemática del balance de materia para $F = 7,0931 \text{ L/s}$	113
Figura 56. Representación esquemática del balance de materia para $F = 8,2721 \text{ L/s}$	117
Figura 57. Representación esquemática del balance de materia para $F= 9,1660 \text{ L/s}$	122
Figura 58. Cantidad de masa retenida en función a la abertura de la malla.	129
Figura 59. Cantidad de sólidos acumulados en el desarenador	131
Figura 60. Comportamiento de la velocidad longitudinal en función al área y caudal	132
Figura 61. Comportamiento de la velocidad de sedimentación de arenas residuales	133

Figura 62. Comportamiento del tiempo de retención de las arenas residuales	134
Figura 63. Comportamiento de solidos totales acumulados en el desarenador	136
Figura 64. Comportamiento de las arenas acumuladas en función al tiempo	137
Figura 65. Comportamiento de la eficiencia del hidrociclón	138
Figura 66. Comportamiento de la turbiedad.....	141
Figura 67. Calidad de agua residual a la salida OVERFLOW del hidrociclón.....	141

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Datos con proyección a futuro.....	9
Tabla 2. Bases de diseño para un desarenador horizontal	17
Tabla 3. Información típica para desarenadores aireados.....	20
Tabla 4. Información típica para desarenadores de vórtice	21
Tabla 5. Características de los ciclones de alta eficiencia	32
Tabla 6. Características de los ciclones convencionales	33
Tabla 7. Características de los ciclones de alta capacidad.....	33
Tabla 8. Factores de relación de d50c de Overflow	35
Tabla 9. Determinación de la gravedad específica	55
Tabla 10. Determinación de la materia orgánica	57
Tabla 11. Determinación granulométrica	58
Tabla 12. Determinación de los sólidos sedimentables	58
Tabla 13. Determinación de sólidos y arenas pura	59
Tabla 14. Parámetros de diseño de hidrociclones de entrada tangencial.....	65
Tabla 15. Parámetros de diseño del hidrociclón.....	66
Tabla 16. Nomenclatura de los hidrociclones de alta eficiencia STAIRMAND.....	67
Tabla 17. Dimensiones del hidrociclón	68
Tabla 18. Determinación granulométrica a través del tamiz	83
Tabla 19. Determinación de la gravedad específica de las arenas residuales.....	85
Tabla 20. Determinación de la densidad aparente de las arenas residuales.....	85
Tabla 21. Determinación de la humedad de las arenas residuales.....	86
Tabla 22. Determinación de materia orgánica presente en arenas residuales.....	87
Tabla 23. Determinación de la velocidad con esfera de polietileno	88
Tabla 24. Determinación de la velocidad con esfera de tecnopor (1)	89
Tabla 25. Determinación de la velocidad con esfera de tecnopor (2)	89
Tabla 26. Determinación de la velocidad longitudinal con área y caudal	90
Tabla 27. Determinación de la velocidad de sedimentación	91
Tabla 28. Determinación del tiempo de retención.....	92
Tabla 29. Cantidad de arena y otras partículas presentes en la muestra de 1L.....	93
Tabla 30. Promedio de cantidad de arena y otras partículas	93

Tabla 31. Sólidos totales en la entrada al desarenador	94
Tabla 32. Sólidos totales a la salida del desarenador.....	95
Tabla 33. Arena a la entrada del desarenador.....	96
Tabla 34. Arena a la salida del desarenador	97
Tabla 35. Determinación de caudal promedio (Caudal 6,3466 L/s).....	106
Tabla 36. Concentraciones para caudal 6,3466 L/s	109
Tabla 37. Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 6,3466 L/s.....	109
Tabla 38. Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 6,3466 L/s.....	110
Tabla 39. Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F= 6,3466 \text{ L/s}$	111
Tabla 40. Determinación de caudal promedio (Caudal 7,0968 L/s).....	112
Tabla 41. Concentraciones para caudal 7,0931 L/s	113
Tabla 42. Determinación de flujo másico de solidos totales para caudal 7,0931 L/s.....	114
Tabla 43. Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 7,0931 L/s.....	114
Tabla 44. Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F= 7,0931 \text{ L/s}$	115
Tabla 45. Determinación de caudal promedio (Caudal 8,2721 L/s).....	116
Tabla 46. Concentraciones para caudal 8,2721 L/s	118
Tabla 47. Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 8,2721L/s.....	118
Tabla 48. Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 8,2721 L/s.....	119
Tabla 49. Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F= 8,2721 \text{ L/s}$	120
Tabla 50. Determinación de caudal promedio (Caudal 9,1660 L/s).....	121
Tabla 51. Concentraciones para caudal 9,1660 L/s	122
Tabla 52. Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 9,1660 L/s.....	123
Tabla 53. Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 9,1660 L/s.....	123
Tabla 54. Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F= 9,1660 \text{ L/s}$	124
Tabla 55. Resumen de los resultados experimentales	126
Tabla 56. Determinación de turbiedad en la entrada y salida superior del hidrociclón.....	127
Tabla 57. Características físicas de las arenas residuales	129
Tabla 58. Determinación de concentración de arena en 40 ml de muestra para $F=6,3466 \text{ L/s}$...	169
Tabla 59. Determinación de concentración de arena en 40 ml de muestra para $F=9,1660 \text{ L/s}$...	172

LISTA DE ANEXOS

Anexo 01. Dimensiones del desarenador de la PTAR “La Totorá”	148
Anexo 02. Cálculos para el diseño del hidrociclón con 80 % de malla en el OVERFLOW ..	149
Anexo 03. Características de la Electrobomba sumergible Pedrollo	155
Anexo 04. Control de operaciones de residuos sólidos PTAR TOTORA 2018	158
Anexo 05. Control de turbiedad en el mes de Diciembre PTAR TOTORA 2018	158
Anexo 06. Resolución Ministerial N° 128-2017-Vivienda	159
Anexo 07. Galería de fotos	165
Anexo 08. Tabla de densidad y viscosidad del agua a diferentes temperaturas	167
Anexo 09. Gráfico de valores de sedimentación	168
Anexo 10. Datos de resultados experimentales del hidrociclón	169
Anexo 11. Costeo de materiales de construcción, instalación y operación del hidrociclón ...	172

RESUMEN

La investigación se enmarca en el estudio de “Construcción y evaluación de un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador en la PTAR “La Totorá”, para determinar los parámetros de operación del hidrociclón y el grado de remoción de las arenas provenientes de la unidad de desarenador.

Se ha construido un hidrociclón con las características siguientes: tiene forma cilíndrica, cónica, la altura total entre la parte cilíndrica y cónica es 56 centímetros, el diámetro de la parte cilíndrica es 14 centímetros y volumen total de la parte cilíndrica y cónica de 5,8990 litros, con una alimentación a través de una tubería de dos pulgadas, cuenta con dos sistemas de salida una para la descarga de arenas en mayor concentración y la otra para salida de las aguas residuales limpia de arenas.

Durante la evaluación de la unidad desarenador se ha determinado la velocidad longitudinal, velocidad de sedimentación, tiempo de retención, acumulación de los sólidos y durante el funcionamiento del hidrociclón se ha determinado el caudal, presión, tiempo hidráulico, cantidad de sólido retirado y grado de remoción.

Los parámetros evaluados de la operación del canal del desarenador fueron los siguientes: Longitud de canal: 30 m, ancho del canal: 1,20 m, altura del canal: 2,50 m, altura de trabajo del canal 1,15 m, caudal máximo: 0,650 m³/s, concentración de ingreso de arena 0,12166 kg/m³ y concentración de salida de arena 0,07746 kg/m³.

La caracterización de la arena residual acumulada en la unidad de desarenador fue analizada dando los siguientes resultados: Contenido de materia orgánica 10,7% que está impregnada a la arena, gravedad específica 2,6208, densidad aparente 11 836 kg/m³, humedad 82,87%.

La mayor eficiencia del hidrociclón en función a la arena separada, en una hora de operación, con un caudal de 9,1660 L/s, fue 73,45 % y una eficiencia de 90% en función al sólido total. Éste resultado demuestra que empleando el hidrociclón se obtiene resultados satisfactorios, comparando con otras tecnologías del pre-tratamiento de las aguas residuales.

ABSTRACT

The investigation is part of the study "Construction and evaluation of a hydrocyclone for the removal of residual sand in the sand trap at the La Totorá wastewater treatment plant, to determine the operation parameters of the hydrocyclone and the degree of removal of the sands coming from the desander unit.

A hydrocyclone has been built with the following characteristics: it has a cylindrical, conical shape, the total height between the cylindrical and conical part is 56 centimeters, the diameter of the cylindrical part is 14 centimeters and the total volume of the cylindrical and conical part is 5,8990 liters, with a feed through a pipe of two inches, has two systems of output, one for the discharge of sands in greater concentration and the other for the exit of clean wastewater from sands.

During the evaluation of the desander unit, the longitudinal velocity, sedimentation rate, retention time, accumulation of the solids have been determined and during the operation of the hydrocyclone the flow rate, pressure, hydraulic time, quantity of solid removed and degree of removal.

The parameters evaluated for operation of the sand trap channel were the following: Channel length: 30 m, channel width: 1,20 m, channel height: 2,50 m, channel working height 1,15 m, maximum flow: 0,650 m³/s, sand input concentration 0,12166 kg/m³ and sand exit concentration 0,07746 kg/m³.

The characterization of the accumulated residual sand in the sand trap unit was analyzed giving the following results: Content of organic matter 10,7 % that is impregnated to the sand, Specific gravity 2,6208, apparent density 11 836 kg/m³, humidity 82,87 %.

The greater efficiency of the hydrocyclone as a function of the separated sand, in one hour of operation, with a flow rate of 9,1660 L/s, was 73,45% and an efficiency of 90% based on the total solid. This result shows that using the hydrocyclone, satisfactory results are obtained, comparing with other wastewater pre-treatment technologies.

INTRODUCCIÓN

La separación sólido/liquido en la unidad de desarenador es una de las operaciones unitarias más importantes en el tratado de aguas residuales. El método ampliamente utilizado para sedimentación de partículas por gravedad es necesario remover cada cierto tiempo.

La remoción de las arenas del desarenador se hace en mayor tiempo significativamente y con mayor cantidad de mano de obra cuando se realiza esta operación mensualmente, y a la vez hacer este trabajo presenta riesgos de enfermedades que pueden causar a los operarios encargados de esta operación.

Uno de los métodos para la remoción de sólidos es a través de medios mecánicos con el cual se reduce esfuerzo de trabajo y horas hombre. Dentro de la categoría de remoción mecánica podemos señalar el empleo de un hidrociclón para la separación de sólido /liquido. La ventaja del hidrociclón es por su bajo costo, alta eficiencia y pequeño en tamaño. El tamaño del hidrociclón hace posible el desarrollo de sistemas de tratado de aguas compactado y portátiles.

El propósito de este trabajo de investigación fue determinar la factibilidad técnica de utilizar el hidrociclón como clarificador de agua residual que contiene sólidos en suspensión como la arena y partículas de materia orgánica. Para este objetivo se ha construido y evaluado un hidrociclón a nivel planta piloto para estudiar el efecto de varios parámetros de performance del hidrociclón cuyos resultados de operación y funcionamiento se presenta en este trabajo demostrando su factibilidad técnica para la remoción de arena presente como suspensión en el fondo del desarenador.

GLOSARIO

M.O	: Materia orgánica
ST	: Sólidos totales
PTAR	: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
HCl	: Ácido clorhídrico
PVC	: Policloruro de vinilo
PSI	: Pounds per Square Inch (Libras por pulgada cuadrada)
ASTM	: American Society of Testing Materials (Asociación Americana de Ensayo de Materiales)
INLET	: Entrada al hidrociclón
OVERFLOW	: Salida superior del hidrociclón
UNDERFLOW	: Salida inferior del hidrociclón
V_{cono}	: Volumen de la parte cónica del hidrociclón
V_{cilindro}	: Volumen de la parte cilíndrica del hidrociclón
V_{colector}	: Volumen del colector de arena
TH	: Tiempo hidráulico (tiempo que demora en salir el agua por el Overflow)
Dc	: Diámetro del hidrociclón
d50c	: Punto de corte al 50% en el hidrociclón
L_c	: Longitud de corte de planchas metálicas
F	: Alimentación
R	: Rebose
D	: Descarga
m/s	: Metros por segundo
L/s	: Litros por segundo
cm	: Centímetros
Q	: Caudal
$T_{h,D}$	: Tiempo de las arenas que demora en depositarse en el desarenador
V_s	: Velocidad de sedimentación de las arenas
RE	: Reynolds
Y_s	: Peso específico
G_s	: Gravedad específica

AL	: Arena limpia
AC	: Acumulación de sólidos y arenas
$\dot{m}_S$	: Flujo másico de sólidos totales
$\dot{m}_A$	: Flujo másico de arenas
$v_{L,D}$	: Velocidad longitudinal
A_D	: Área de flujo del agua residual en el desarenador
C_{in}	: Concentración en el ingreso al desarenador
C_{out}	: Concentración en la salida del desarenador
C_x	: Concentración de sólidos totales
C_y	: Concentración de arena limpia

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1.ANTECEDENTES

Se han publicado diversos usos del hidrociclón en las industrias; sin embargo, casi no existe uso especial para el proceso de remoción de arenas residuales en una planta de tratamiento de aguas residuales, más si en la industria minera que es el principal usuario de los hidrociclones, siendo aplicado en clasificación de líquidos, espesamiento, lavado de sólidos y operaciones de ordenamiento de partículas ya sea por densidad o forma. Entre tantos trabajos sobre diseño y construcción de hidrociclones para uso conveniente destacan los siguientes:

1.1.1.A nivel Internacional

Edgar S. Doroteo, (2010), egresado de la Universidad Nacional Autónoma de México, Coyoacán, en su trabajo de tesis DISEÑO Y OPERACIÓN DE UN HIDROCICLÓN PARA MEJORAR LA TÉCNICA DE LAVADO DE SUELOS, la problemática a la que dio solución fue para suelos contaminados con hidrocarburos, con contenido de arenas y finos que son difíciles de separar de la suspensión que se forma en la etapa final, después de lavado, debido a la formación de coloides.

La técnica de lavado de suelos consistió en lavar el suelo, contaminado con hidrocarburos, que contiene partículas arenas y finas (limos y arcillas), con una solución con surfactantes mediante un mezclado mecánico, durante el cual se forma una suspensión muy difícil de separar de las

partículas finas del suelo. Es por esta razón diseñó, construyó un hidrociclón para hacer esta separación de sólidos en menor tiempo. Seleccionó el surfactante Tween 80 a una concentración de 0,5 % p/p como agente de lavado, logrando remociones de hidrocarburos fracción pesada en una sola carga de 60 %, en un sistema microcosmos de lavado.

Los resultados que ha mostrado con la separación de las partículas sólidas por medio del hidrociclón fue muy satisfactoria, logrando eficiencias de 78%, con un flujo de 150 L/min y 20% de sólidos en la alimentación.

1.1.2. A nivel Nacional

Diego F. Paredes, (2018), egresado de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, en su trabajo de tesis DISEÑO DE UN HIDROCICLÓN PARA LA CLASIFICACIÓN DE PARTÍCULAS SÓLIDAS DE LECHADA DE CAL EN PLANTA CONCENTRADORA, buscó optimizar la clasificación de tamaño de partícula obteniendo una lechada de cal de buena calidad que permitió satisfacer las necesidades de un proceso de flotación.

Por tal motivo diseñó un hidrociclón para una capacidad de 2000 TMS/día, y una capacidad de flujo de pulpa de 136 m³/día, este parámetro de flujo podrá variar de acuerdo a las necesidades de flujo que requiera la planta, debido a esto diseñó varios hidrociclones en paralelo. La función de su hidrociclón fue clasificar la pulpa de ingreso al ciclón en dos tipos de flujo; un flujo de pulpa de partículas gruesas direccionada al proceso de molienda y otra pulpa con partículas finas direccionada al proceso de flotación.

Estableció la capacidad de planta la cual fue 2000 TMS/día y un flujo de pulpa de 482,38 m³/h, logrando determinarse del número de hidrociclones de 8 unidades siendo acorde a las necesidades de la planta. Además de otorgar las dimensiones del nido de hidrociclones.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, las plantas de tratamiento de aguas residuales especialmente en la etapa preliminar a nivel mundial cuentan con unidades capaces de trabajar correctamente y sin dar problemas a PTAR y al medio ambiente, a nivel nacional el crecimiento imparable de la

población, la contaminación de los recursos hídricos, la tecnología no adecuada son las principales razones por las cuales las plantas de tratamiento de aguas residuales generan impactos ambientales.

En el Perú el tratamiento de aguas residuales sigue la Norma O.S.090 en el cual las unidades de desarenador horizontal se utilizan para remoción de las arenas provenientes de las aguas residuales, debido a bajas inversiones para su construcción.

En la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá” existe deficiente mantenimiento de la unidad de desarenador en la remoción de arenas manualmente, por el incremento de altura de arena o reducción del área del flujo del agua residual esto ocasiona la sedimentación de material particulado orgánico (heces fecales) lo que provoca la generación de malos olores de sulfuro de hidrógeno y metano por la desnaturalización de materia orgánica.

La remoción de arenas lo hacen con una frecuencia de uno al mes, a veces la remoción lo hacen más de un mes debido a que en el lecho de secado el tiempo de lixiviación demora demasiado tiempo porque al momento de retirar las arenas los operarios usan motobombas para retirar las arenas acumuladas en el fondo del desarenador, lo cual al lecho de secado llegan con una cierta cantidad de agua residual, los sólidos secados en el lecho de secado son aproximadamente 60 m³.

Entonces el problema viene ahí al sobrepasar el límite de altura o área de flujo del agua residual que debería tener para trabajar correctamente en el desarenador, pero como no es así la concentración de sólidos y/o arenas a la salida del desarenador aumenta y esto ocasiona una baja eficiencia del resto de las unidades de tratamiento.

De este hecho se reconoce la necesidad de realizar la investigación a nivel piloto sobre el impacto de la remoción de las arenas residuales de la unidad de desarenador, establecer una metodología que permita el tratamiento adecuado para reducir los malos olores generados en la unidad de desarenado y está a su vez puedan servir para una futura implementación a nivel planta en la PTAR “La Totorá”- Ayacucho.

1.2.1. Delimitación del problema

Este proyecto de tesis de construcción y evaluación de un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador se ha realizado con aguas residuales contenidas de sólidos en suspensión, de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá” – Ayacucho. Los resultados obtenidos serán a escala piloto en el equipo de hidrociclón previamente instalado en la PTAR “La Totorá”.

La construcción del equipo de hidrociclón se ha realizado en los espacios del taller electromecánico Holger K. Hansen de la FIQM-UNSCH viene hacer el lugar adecuado para esta construcción ya que cuenta con una infraestructura de maquinarias, herramientas de trabajo y personal profesional.

1.2.2. Formulación del problema

Como una respuesta a la importancia de la remoción de arenas de la unidad de desarenador de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá”, considerando como principal problema que afecta al tratamiento adecuado del resto de las unidades y la falta de implementación de un equipo capaz de mejorar esta remoción, se establece y formula el problema del presente proyecto de tesis:

Problema principal

- ¿Cuáles son los parámetros de diseño para construir un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales la Totorá?

Problemas secundarios

- ¿Cuáles son los parámetros operativos del canal del desarenador que actualmente opera en la PTAR Totorá?
- ¿Cuáles son las características de las arenas residuales contenidos de materia orgánica, retiradas o eliminadas de los canales del desarenador de la PTAR Totorá?
- ¿Cuál es el grado de remoción del hidrociclón diseñado y construido a nivel piloto para la remoción de las arenas residuales?

1.3. OBJETIVOS

Objetivo principal

- Determinar los parámetros de diseño de un hidrociclón para la remoción de arenas residuales en el desarenador en la PTAR la Totorá - Ayacucho.

Objetivo secundario

- Determinar los parámetros operativos del canal del desarenador que actualmente opera en la PTAR Totorá.
- Caracterizar las arenas residuales contenidos de materia orgánica, retiradas o eliminadas de los canales del desarenador de la PTAR Totorá.
- Determinar el grado de remoción del hidrociclón diseñado y construido a nivel piloto para la remoción de las arenas residuales.

1.4. IMPORTANCIA

La mayor importancia es la remoción de arenas con hidrociclón en la unidad de desarenador con fines de remover los sólidos del desarenador y mitigar los malos olores en esta unidad por la acumulación de arena con presencia de sólidos particulados orgánicos (heces fecales) lo que provoca la generación de H_2S (sulfuro de hidrógeno).

La remoción de arenas residuales con hidrociclón con fines de separar la arena y otras partículas compactas más pesadas que el agua sirve como filtro previo antes del ingreso a los tanques Imhoff dando como resultado el trabajo correcto al resto de las unidades del proceso de tratamiento.

En resumen, reducir la concentración de arenas a la salida del desarenador con fines de mejorar la eficiencia del resto de las unidades de tratamiento y de la misma manera contribuir en la reducción de la cantidad de agua en el lecho de secado, mediante la remoción de sólidos con el hidrociclón, dando como resultado el tiempo mínimo de secado de los sólidos y arenas y así evitar o aliviar los impactos negativos que se causan al ambiente humano y natural.

De la misma manera la implementación de este método por medios mecánicos como el

hidrociclón en las plantas de tratamiento de aguas residuales en el país que tienen los mismos problemas en la remoción de arenas.

1.5. JUSTIFICACIONES

➤ Justificación tecnológica – económica

La tecnología para la remoción de sólidos existe, lo que falta es evaluar los parámetros para equipos pilotos para luego escalar a condiciones reales para una planta en funcionamiento con un equipo de bajo costo en construcción e instalación que minimiza la energía y horas hombre. Los materiales, accesorios se encuentran disponibles en el mercado de la región y los equipos para la caracterización se encuentran en el laboratorio de la PTAR la totora.

Una vez construido el equipo nos brindará datos reales luego de una prueba el cual realizando un escalamiento pueda ser utilizado para mejorar el funcionamiento del desarenador de la planta de “La Totorá”.

➤ Justificación social

El impacto de este trabajo se verá reflejado en reducir los malos olores generados en el desarenador y en el lecho de secado de arenas porque reducirá el tiempo de secado, lo cual ya no será una molestia para la población ubicada alrededores y así mismo reducir riesgo de diversas enfermedades que puedan ocasionar.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LA TOTORA”

La EPS SEDA AYACUCHO S. A. Es la empresa prestadora de los servicios de agua y saneamiento de las ciudades de Huamanga y Huanta del departamento de Ayacucho y atiende una población urbana total de aproximadamente 230 000 habitantes, la mayor parte de la cual está asentada en la ciudad de Huamanga con 197 000 habitantes (86%). (SEDA, 2015).

La Planta de Tratamiento de Aguas Servidas de la ciudad de Ayacucho denominada PTAR TOTORA, se encuentra ubicada al norte de la ciudad de Ayacucho, a unos 3,50 km del centro de la ciudad.

La mayor parte de las aguas residuales procedentes de la ciudad de Huamanga son tratadas en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) “La Totorá” como se puede ver en la figura 1. Con una capacidad hidráulica de 470 L/s y una capacidad de tratamiento de la carga orgánica de aproximadamente 156 220 habitantes-equivalentes (50 g DBO₅/hab.d). (SEDA, 2015).

La tecnología convencional de tratamiento de la PTAR Totorá incluye las siguientes etapas:

- a) Tratamiento preliminar (pozo de grueso, cámara de rejas manuales y mecanizadas, desarenador).

- b) Tratamiento primario mediante 6 Tanques Imhoff.
- c) Tratamiento secundario de 84 % del caudal del afluente mediante 4 filtros percoladores y 16 % del caudal mediante 2 lagunas facultativas.
- d) Tratamiento biológico mediante 3 lagunas de maduración y la desinfección con cloro.



Figura 1. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá” (SEDA, 2015).

Según los últimos reportes, la PTAR Totorá trabaja actualmente con cargas orgánicas de hasta 180 000 – 210 000 habitantes-equivalentes; valores que se acercan y sobrepasan aparentemente su capacidad de diseño. Sin embargo, la PTAR produce un efluente, cuya calidad cumple los Límites Máximos Permisibles (LMP) de la normatividad peruana, mostrando entre otros, concentraciones de la DBO soluble < 100 mg/L en el efluente de la PTAR. (SEDA, 2015).

Topográficamente el área donde se encuentra localizada las unidades de proceso de la PTAR Totorá cuyas cotas varían desde 2606 msnm a 2617 msnm; primigeniamente la PTAR Totorá ha sido construida en el año 1974 para una población de 60 000 habitantes aproximadamente; en la actualidad, en diciembre del 2004 ha sido puesta en operación el Proyecto de Ampliación y Mejoramiento de la PTAR de la ciudad de Ayacucho; el proyecto mencionado ha tomado como base los siguientes datos e igualmente, el proyecto ha establecido las características del agua residual que se describe en la tabla 1.

Tabla 1*Datos con proyección a futuro*

DESCRIPCIÓN	HORIZONTE 2010	HORIZONTE 2020
Población total (hab)	208 282	278 215
Cobertura (%)	75	80
Población servida (hab)	156 212	222 572
Caudal diario (L/s)	443	618
Caudal medio horario (L/s)	537	697
Caudal pico (L/s)	769	989

Fuente: (SEDA, 2015).

La moderna Planta de Tratamiento puesta en operación en diciembre del año 2004 consta de las siguientes unidades:

a) Tratamiento preliminar

- 01 Canal de ingreso
- 01 Cámara de materiales gruesos.
- 01 Rejillas manuales de 2" de espaciamiento.
- 01 Lecho de grava.
- 01 Desarenador de 03 canales.
- 02 Rejillas automáticas finas de 6 mm.
- 01 Tornillo transportador de basuras
- 01 Lecho de arena.
- 01 Medidor ultrasónico de caudales.

b) Tratamiento primario

- 06 Tanques Imhoff.
- 03 Lechos de secado.

c) Tratamiento biológico

- 04 Filtros percoladores.
- 04 Sedimentadores integrados.
- 02 Lagunas facultativas.
- 03 Lagunas de maduración.
- 01 Laguna de cloración.

d) Unidad de servicios

- 01 Edificio de operación y laboratorio.
- 01 Estación de bombeo.
- 01 Casa fuerza o grupo electrónico.
- 01 Estación de cloración.

2.2. CONTAMINACIÓN DEL AGUA

La contaminación del agua puede definirse como la alteración de su calidad por la acción natural o humana que hace que no sea adecuada para la aplicación a la que se destina. Las alteraciones que puede sufrir el agua pueden ser físicas, químicas o biológicas (Barboza, 2013).

2.2.1. Alteraciones físicas.

- **Propiedades organolépticas.** Tales como color, olor (olor debido a la presencia de materiales disueltos o suspendidos; olor a la presencia de productos químicos o a materia orgánica en descomposición o a organismos como las algas o los hongos).
- **Temperatura.** Esta variable está relacionada con diversos fenómenos que ocurren en el agua, como la solubilidad de gases y sales, así como en los procesos biológicos, la elevación de la temperatura del agua puede acelerar la putrefacción, aumentar la solubilidad de las sales y disminuir la de los gases.
- **Materia en suspensión.** Generalmente el agua en movimiento transporta sólidos insolubles. Según el tamaño de las partículas, se pueden formar suspensiones, que pueden ser inestables y sedimentar cuando el agua queda en reposo, o pueden ser estables incluso con el agua en reposo. En el primer caso se habla de “sedimento”, mientras que en el segundo caso se habla de “turbidez”.
- **Espuma.** Un agua formará espuma si contiene agentes tensoactivos, que son sustancias que disminuyen la tensión superficial de los líquidos y, por tanto, aumentan la estabilidad de las burbujas gaseosas que puedan formarse en la superficie. El ejemplo más representativo de agentes tensoactivos son los detergentes sintéticos, que son vertidos en las aguas naturales en grandes cantidades por su extendido uso industrial y doméstico.
- **Radiactividad.** Todas las aguas presentan una determinada radiactividad natural, como consecuencia de la presencia de isótopos radiactivos solubles, en especial los de potasio, provenientes de diversos tipos de rocas, y que no suponen peligro para los seres vivos.

2.3. AGUAS RESIDUALES

Son principalmente las aguas de abastecimiento de una población, después de haber sido contaminadas por diversos usos o procesos. Se denomina aguas residuales a aquellas que resultan del uso doméstico o industrial del agua. Se les llama también aguas servidas, aguas negras o aguas cloacales. Son residuales pues, habiendo sido usada el agua, constituyen un residuo, algo que no sirve para el usuario directo; son negras por el color que habitualmente tienen. Algunos autores hacen una diferencia entre aguas servidas y aguas residuales en el sentido que las primeras solo provendrían del uso doméstico y las segundas corresponderían a la mezcla de aguas domésticas e Industriales. (Torres & Briceño, 2016). como se puede ver en la figura 2.



Figura 2. Aguas residuales

Las aguas residuales urbanas son conducidas por sistemas de redes alcantarillado y de ser posible tratadas en una planta de tratamiento de aguas residuales para su depuración antes de su vertido en el cuerpo receptor, aunque no siempre es así en todos los países. Las aguas residuales generadas en áreas o viviendas sin acceso a un sistema de alcantarillado centralizado se tratan en el mismo lugar, generalmente en fosas sépticas, y más raramente en campos de drenaje séptico, y a veces con biofiltros (Torres & Briceño, 2016).

2.3.1. Clasificación de las aguas residuales

- a) Aguas blancas o pluviales. Son aguas procedentes de drenajes o de escorrentía superficial. Se caracterizan por grandes aportaciones intermitentes y escasa contaminación. Sus caudales, en una superficie urbanizada, son de 50 a 200 veces superiores a los correspondientes a las medias de los vertidos domésticos, comerciales e industriales. Las cargas contaminantes se incorporan al agua al atravesar la lluvia la atmósfera, o por el lavado de superficies y terrenos (escorrentía superficial).
- b) Aguas negras o urbanas. Son las aguas procedentes de los vertidos de la actividad humana, doméstica, comercial, industrial, agrícola, etc. Sus caudales son menores y más continuos, y su contaminación mucho mayor.
- c) Aguas grises. Son aguas procedentes de las bañeras, duchas y lavabos, con escasa contaminación y que con tratamientos simples pueden reciclarse y reutilizarse fácilmente (Trapode, 2016).

2.3.2. Niveles de tratamiento

Las aguas residuales se pueden someter a diferentes niveles de tratamiento, dependiendo del grado de purificación que se quiera. Es tradicional hablar de tratamiento primario, secundario, etc., aunque muchas veces la separación entre ellos no es totalmente clara. Así se pueden distinguir: (Trapode, 2016).

- a) **Pretratamiento:** Es un proceso en el que usando rejillas, cribas y desarenadores se separan restos voluminosos como arenas, palos, telas, plásticos, etc. (OS.090, 2009).
- b) **Tratamiento primario:** Hace sedimentar los materiales suspendidos usando tratamientos físicos o fisicoquímicos. En algunos casos dejando, simplemente, las aguas residuales un tiempo en grandes tanques o, en el caso de los tratamientos primarios mejorados, añadiendo al agua contenida en estos grandes tanques, sustancias químicas que hacen más rápida y eficaz la sedimentación. (Trapode, 2016).

También se incluyen en estos tratamientos la neutralización del pH y la eliminación de contaminantes volátiles como el amoníaco (desorción). Las operaciones que incluye son el desaceitado y desengrase, la sedimentación primaria, la filtración, neutralización y la desorción (stripping).

- c) **Tratamiento secundario:** Elimina las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos. El proceso secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas. Este proceso se suele hacer llevando el efluente que sale del tratamiento primario a tanques en los que se mezcla con agua cargada de lodos activos (microorganismos). Estos tanques tienen sistemas de burbujeo o agitación que garantizan condiciones aerobias para el crecimiento de los microorganismos. Posteriormente se conduce este líquido a tanques cilíndricos, con sección en forma de tronco de cono, en los que se realiza la decantación de los lodos. Separados los lodos, el agua que sale contiene muchas menos impurezas. (Trapode, 2016).
- d) **Tratamientos más avanzados:** Consisten en procesos físicos y químicos especiales con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes como son: materiales en suspensión, materiales disueltos, fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, virus, compuestos orgánicos, etc.

Es un tipo de tratamiento más caro que los anteriores y se usa en casos más especiales: para purificar desechos de algunas industrias, especialmente en los países más desarrollados, o en las zonas con escasez de agua que necesitan purificarla para volverla a usar como potable, en las zonas declaradas sensibles (con peligro de eutrofización) en las que los vertidos deben ser bajos en nitrógeno y fósforo, etc. (Trapode, 2016).

2.4. DESARENADOR

El desarenado consiste en un proceso en el que se produce una separación por decantación diferencial o selectiva en forma discreta, de todos aquellos sólidos en suspensión de densidad elevada (compuestos inorgánicos), impidiendo la sedimentación de la materia en suspensión de baja densidad (de naturaleza orgánica). (Sainz, 2005).

Las partículas de naturaleza inorgánica eliminada en este proceso, son conocidas con el nombre genérico de arenas, incluyendo en dicha denominación otros productos presentes en el agua residual, como pueden ser escorias, gravas, cascaras de huevo, objetos metálicos, etc.

La característica fundamental de estos elementos inorgánicos separados en este proceso es que son totalmente estables, lo que con lleva que no se van a generar descomposiciones posteriores de los mismos.

Estas unidades en sus diferentes versiones, son utilizadas en todas las plantas depuradoras urbanas, no siendo de utilidad de forma general en las depuradoras de aguas industriales. Dentro de la industria se pueden encontrar en las azucareras en el tratamiento del as aguas de arrastre y transporte de la remolacha (Sainz, 2005).

2.4.1. Objetivos del proceso de desarenador

En las plantas depuradoras de aguas residuales urbanas, el proceso de desarenado es el segundo que se instala a continuación del desbaste, con el fin de eliminar los sólidos en suspensión de densidad elevada, por los graves problemas que estos contaminantes pueden ocasionar a las instalaciones. Los desarenadores eliminan todos aquellos sólidos en suspensión, con un peso específico igual o mayor de 2,65 y un tamaño de partícula superior a 0,15 – 0,2 mm (Sainz, 2005).

Entre los fines más importantes encomendados al proceso de desarenado, se encuentran los siguientes: (Sainz, 2005).

- Evitar problemas de abrasión en los equipos mecánicos, al tratarse las arenas de compuestos de elevada dureza, aumentando con ello la vida de los diferentes equipos de la planta y en consecuencia la vida útil de la depuradora.
- Eliminar deposiciones en canales y tuberías.
- Evitar la presencia de solidos inertes en la línea de tratamiento de fangos.
- Mayor facilidad de evacuación de la planta depuradora, al tratarse de solidos inertes, y poder ser su destino final los vertederos de inertes.
- Si no es retirada en esta operación, supondría su eliminación con los fangos o lodos de tratamiento primario, depositándose en el fondo de los digestores, dando lugar a operaciones de limpieza engorrosas además de ocupar volumen inútilmente.

2.4.2. Tipos de desarenadores

a) Desarenadores de flujo horizontal

Los desarenadores de flujo horizontal serán diseñados para remover partículas de diámetro medio igual o superior a 0,20 mm. Para el efecto se debe tratar de controlar y mantener la velocidad del flujo alrededor de 0,30 m/s con una tolerancia más 20 %. (OS.090, 2009).

Como es conocido, en las plantas depuradoras urbanas, el caudal varía de forma importante a lo largo del día, surgiendo el problema de mantener constante la velocidad en el canal.

Para desarenadores de limpieza manual se deben incluir las facilidades necesarias (compuertas) para poner fuera de funcionamiento cualquiera de las unidades. Las dimensiones de la parte destinada a la acumulación de arena deben ser determinadas en función de la cantidad prevista de material y la frecuencia de limpieza. (OS.090, 2009).

Los desarenadores con control de velocidad son canales de sedimentación largos y estrechos, generalmente se cuenta con un mínimo de dos canales para fines de limpieza. En ocasiones, se emplean varios canales para el control de la velocidad, pero se puede lograr un arreglo más económico y eficiente usando un panel de control a la entrada y salida del mismo. Las secciones de control incluyen vertedores proporcionales tipo Sutro, canales Parshall, canal parabólico (Ruiz, 2010). Como en la figura 3.



Figura 3. Desarenadores horizontales (Ruiz,2010).

➤ **Fundamentos del proceso**

Un desarenador de flujo horizontal, consiste en un canal rectangular de longitud adecuada, que permita la decantación de las arenas.

Las partículas sólidas están sometidas a dos velocidades: de arrastre por la velocidad del agua y de caída por su densidad.

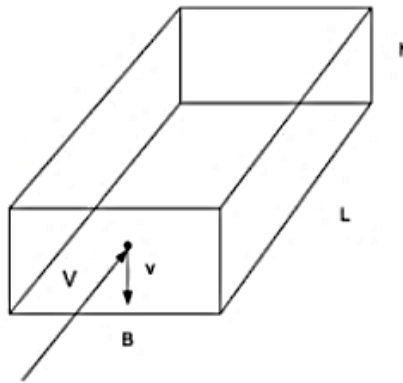


Figura 4. Esquema de un desarenador de flujo horizontal (Sainz, 2005).

(Sainz,2005). En su libro plantea las siguientes ecuaciones para calcular la superficie transversal y el tiempo que demora en depositarse las arenas en el desarenador.

La superficie transversal del desarenador será:

$$S_t(m^2) = \frac{Q[\frac{m^3}{s}]}{V[\frac{m}{s}]} = B(m).h(m) \quad \dots (1)$$

Donde:

S_t : Superficie transversal, m^2

Q : Caudal a tratar, m^3/s

V : Velocidad longitudinal, m/s

B : Altura del canal, m

h : Altura de la lámina de agua, m

El tiempo que una partícula tarda en caer será:

$$t(s) = \frac{h[m]}{V[m/s]} \quad \dots (2)$$

Donde:

t : Tiempo, s

h : Altura lamina del agua, m

V : Velocidad de caída de la partícula, m/s

En la tabla 2 se muestra las bases de diseño de un desarenador de flujo horizontal.

Tabla 2

Bases de diseño para un desarenador horizontal

Parámetros	Rango
Peso específico de partículas a eliminar	$\geq 2,65$
Tamaño de partículas	$> 0,2 - 0,15 \text{ mm}$
Velocidad en canal (V)	$0,25 - 0,35 \text{ m/s}$
Velocidad de decantación (v)	$0,018 \text{ m/s}$
El tiempo de retención del agua en el desarenador	$45- 90 \text{ s}$
La relación anchura/profundidad del canal	$1 \text{ y } 2,5$
Factor de compensación de la longitud por turbulencia	$1,25 \text{ y } 1,5$

Fuente: (Sainz, 2005).

b) Desarenadores aireados

Desarenadores de este tipo (figura 5) se emplean para la remoción selectiva de arena. Son similares a los tanques de aeración con flujo en espiral. La corriente en espiral se genera por la acción de difusores de aire instalados en uno de los lados del tanque, a una altura de 0,6 a 0,9 m a partir del fondo. Las partículas de arena presentes en el agua residual al entrar al desarenador sedimentan con diferente velocidad ya que esta depende del tamaño, gravedad específica y la velocidad de rotación o agitación en el tanque. La rapidez de difusión del aire y la forma del tanque son parámetros importantes que deben ser considerados ya que gobiernan la agitación y la sedimentación de las partículas.

La rapidez del aire se ajusta para crear una velocidad cercana al fondo lo suficientemente baja para que sedimente la arena, mientras tanto, las partículas orgánicas, que son menos pesadas, son arrastradas fuera del tanque. Generalmente, los desarenadores aireados se diseñan para eliminar partículas de arena con gravedad específica de 2,65, retenidas en un tamiz de malla 65

(diámetro de 0,21 mm). Asimismo, pueden eliminar eficientemente partículas más pequeñas al reducir la velocidad del aire. El sistema debe estar controlado hidráulicamente ya que, de no estarlo, la operación será deficiente. Este problema se soluciona colocando una mampara longitudinal cerca de la cámara de colección de arena (Ruiz, 2010).



Figura 5. Desarenador aireado (Ruiz, 2010).

En los sistemas de desarenadores aireados, el aire introducido a lo largo del tanque con un sistema de aireación colocado en la parte inferior, provoca un espiral patrón de velocidad, perpendicular al flujo, a lo largo del tanque. Las partículas más pesadas, con velocidades de sedimentación mayores, caen al fondo, mientras que el aire suspende las partículas orgánicas más ligeras, que más tarde serán llevadas fuera del tanque. La acción de balanceo inducido por los difusores de aire es independiente del flujo a través del tanque. Las partículas más pesadas que se depositan en el fondo del tanque se mueven por el flujo en espiral del agua en la parte inferior del tanque y luego en una tolva para depositar la arena. La cadena y cangilones, colectoras, tornillos sinfines, cucharones de almeja, bombas de impulsor o bombas de aire empotradas conducen la arena recogida de la tolva del tanque.

➤ **Criterios de diseño típicos para desarenadores aireados que evitan problemas de operación:** (Ruiz, 2010).

- Las tasas de aire suelen oscilar desde 4,6 hasta 12,4 L/ (s.m) de longitud del tanque. Las tasas tan bajas como 1,5 L/ (s.m) se han utilizado en tanques poco profundos y estrechos.

Tasas mayores de 7,7 L/ (s.m) se utilizan a menudo para tanques profundos y anchos, colocando válvulas y medidores de flujo para el monitoreo y el control de la velocidad del flujo de aire en cada banco de difusores. La aireación es preferible con la burbuja de difusores de banda ancha, la cual es cónica y permite incluso la eliminación de la arena a lo largo de la longitud de la cámara y puede tomarse el suministro de aire del proceso de la planta para la cámara de arena, pero se prefiere utilizar sopladores exclusivos para el desarenador.

- Como buena práctica, un tiempo mínimo de retención hidráulica es de 3 minutos, a caudales máximos instantáneos; así se capturará de forma confiable 95 % de la arena de 0,21 mm de diámetro. Los tiempos de retención más largos mejoran la remoción de arena y puede ser necesario preservar para capturar partículas de arena más pequeñas. El tiempo de retención, sin embargo, es un criterio menos importante que el deflector y la ubicación del difusor.
- La relación apropiada longitud-ancho de la cámara oscila entre 2,5:1 y 5:1. Sin embargo, se han utilizado con éxito los tanques cuadrados cuando la ubicación del difusor de aire es adecuada (perpendicular al flujo a través del tanque) y cuando se colocan deflectores para evitar los cortocircuitos
- En la entrada y la salida del tanque se colocan deflectores de manera que el flujo a través del tanque sea perpendicular al patrón de la espiral. Los deflectores de entrada y de salida servirán para disipar la energía y reducir al mínimo los cortocircuitos. Un buen diseño debe incluir deflectores intermedios a través del ancho del tanque para evitar cortocircuitos a través del centro del movimiento del agua.

Generalmente, los desarenadores aireados se diseñan para eliminar partículas de arena con gravedad específica de 2,5, retenidas en un tamiz de malla 0,65 (diámetro de 0,21 mm). Así mismo pueden eliminar, eficientemente, partículas más pequeñas al reducir la velocidad del aire. El sistema debe estar controlado hidráulicamente ya que de no hacerlo la operación será deficiente. Este problema se soluciona colocando una mampara longitudinal cerca de la cámara de colección de arena. La tabla 3 presenta las características comunes para desarenadores aireados (Ruiz, 2010).

Tabla 3.*Información típica para desarenadores aireados*

Elemento	Intervalo	Típico
Tiempo de detención a caudal punta (m)	2,0 -5,0	3,0
Profundidad (m)	2,0 -5,0	-
Longitud (m)	7,5 - 20	-
Anchura (m)	2,5 -7,0	-
Relación anchura - profundidad del canal	1:1 a 5:1	1,5 : 1
Relación longitud – anchura	3:1 a 5:1	4:1
Suministro de aire (m ³ /min, m de longitud)	0,18 - 0,45	0,3
Cantidad de arena (m ³ /10 ⁶ m ³)	4,0 - 195	15,0

Fuente: (Ruiz, 2010).**c) Desarenadores de vórtice**

Este tipo de desarenadores trabaja con un flujo tipo vórtice y aprovecha las fuerzas centrífuga y gravitacional. La figura 6 muestra un desarenador de estas características. El agua a tratar se introduce de forma tangencial cerca del fondo y sale de forma tangencial a través de la apertura en la parte superior del tanque. Dentro de la unidad se crea un vórtice libre en el cual el producto de la velocidad tangencial por el radio es constante. La fuerza centrífuga a la que es sometida una partícula en este campo de flujo es igual al cuadrado de la velocidad dividida entre el radio; cuando la fuerza centrífuga es inversamente proporcional al radio, se traduce en un incremento de 125 veces la fuerza centrífuga. La figura 7 presenta de forma esquemática el funcionamiento de un desarenador de vórtice. Dada la magnitud de la fuerza centrífuga cerca del punto de descarga, algunas de las partículas, de acuerdo con su tamaño, densidad y fuerza de arrastre, son retenidas dentro del vórtice, mientras que otras son arrastradas fuera de la unidad. En resumen, la arena se queda en la unidad y las partículas orgánicas salen con el efluente. La arena se extrae por la apertura del fondo de las unidades o bien, se succiona mediante una bomba de aire. La tabla 4 presenta las características comunes para desarenadores de vórtice (Ruiz, 2010).

Tabla 4.

Información típica para desarenadores de vórtice

Elemento	Intervalo	Típico
Tiempo de detención a caudal medio (s)	-	30
Dimensiones		
Diámetro (m)	-	-
Cámara superior (m)	2,5 – 7,0	-
Cámara inferior (m)	0,9 – 1,80	-
Altura (m)	2,70 – 5,0	-
Rendimientos de eliminación (%)		
Malla 50 (0,30 mm)	-	95+
Malla 70 (0,24 mm)	-	85+
Malla 100 (0,15 mm)	-	65+

Fuente: (Ruiz, 2010).



Figura 6. Desarenador de vórtice (Ruiz, 2010).

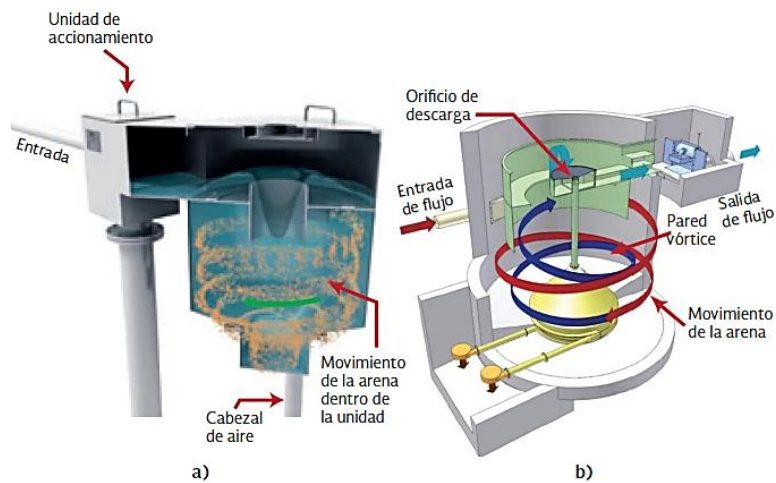


Figura 7. Desarenadores de vórtice a) Sistema PIST b) Sistema Teacup. (Ruiz, 2010).

2.4.3. Remoción de arenas residuales

Cuando se haga el diseño del pretratamiento hay que tener muy en cuenta el volumen de arenas extraídas, ya que su falta de previsión puede dar importantes problemas de funcionamiento en la depuradora al llegar volúmenes superiores a los considerados teóricamente. Esto puede ocurrir en poblaciones con calles sin pavimentar, con redes de alcantarillado en mal estado. Si no tenemos datos reales de la cantidad de arena posible, es necesario calcular por exceso los volúmenes de extracción, considerando valores normales (Metcalf & Eddy, 1996):

- Redes Separativas 5 L/m³ de agua residual
- Redes Unitarias 50 L/m³ de agua residual.

Otro dato a tener en cuenta proveniente de varias plantas es que se pueden recoger de 1-15 L/hab/año.

El termino arena se emplea para referirse a las arenas propiamente dichas, a las gravas, cenizas y cualquier otro material pesado cuya velocidad de sedimentación o peso específico sea considerablemente mayor a la de los sólidos orgánicos susceptibles a la descomposición presentes en el agua residual (Solís & Jerónimo, 2003) .

Las arenas se remueven de las aguas residuales con los siguientes fines:

- a) Proteger los equipos mecánicos de la abrasión y del excesivo desgaste.
- b) Reducir la formación de depósitos pesados en unidades y conductos posteriores.
- c) Reducir la frecuencia de limpieza de los digestores por causa de acumulación excesiva de arenas.

La extracción de las arenas de los desarenadores puede ser (Metcalf & Eddy, 1996):

- a) Manuales: En plantas pequeñas, con desarenadores de tipo canal.
- b) Mecánicos: En los desarenadores de canal la extracción se realiza mediante unas bombas especiales incorporadas a un puente y con la longitud adecuada para llegar al fondo del canal, donde se depositan las arenas, pero sin llegar a tocar el suelo. El puente va avanzando a lo largo del canal y al mismo tiempo la bomba va succionando las arenas depositadas.

La arena depositada en el fondo de los desarenadores de flujo horizontal, se extrae de forma manual, y tiene unas concentraciones de materia orgánica importantes.

La arena extraída, generalmente se envía a un lavador (clasificador) de arenas, para reducir la materia orgánica presente a un mínimo (Sainz, 2005).

La cantidad de arena a eliminar dependerá de:

- Tipo de red de colectores, ya sea unitaria o separativa.
- Característica del área servida.
- Superficie de zonas verdes en la zona de recogida.
- Pluviometría de la zona.

En los desarenadores aireados la arena puede extraerse mediante air-lift (succión a través de unas bombas situadas en la base de la unidad con recogida en tolvas inferiores), bombas especiales o rasquetas de barrido que empujan las arenas a una tolva de las que son extraídas al exterior (Metcalf & Eddy, 1996).

Las variaciones en la cantidad de arena recogida varían de forma importante de unas instalaciones a otras. En tiempo seco la cantidad de arena extraída puede estimarse entre 10 y 50 m³ de arena por cada millón de m³ de agua tratada. En caso de lluvia, los valores indicados anteriormente, van a verse incrementados de forma muy importante (Sainz, 2005).

2.4.4. Lavado de arenas residuales

Una vez sacadas las arenas del desarenador, hay que eliminar toda la cantidad posible de agua que llevan. La separación arena-agua se puede hacer (Metcalf & Eddy, 1996):

- Sedimentación en un depósito poco profundo, con evacuación del agua por losas filtrantes o vertedero de rebose.
- Separación mecánica mediante Tornillo de Arquímedes o Clasificador Alternativo de Rastrillos, y almacenamiento en una tolva fija o en contenedor.
- En instalaciones importantes se procede a veces a un lavado de las arenas con el fin de

disminuir su contenido en materia orgánica. Se puede realizar con Tornillo de Arquímedes con agua de aportación a contracorriente.

Las tareas que debemos realizar son:

- Vaciar los depósitos de arena de los canales de desarenado manual cuando veamos que está lleno.
- Reparar y cambiar los difusores rotos en los desarenadores aireados.
- Vigilar que el caudal de aire en los desarenadores aireados es el adecuado.
- Realizar el mantenimiento de todos los equipos (bombas, rasquetas, cadenas, clasificadores de arena, etc.) Según las recomendaciones de los fabricantes.

Esta zona es especialmente resbaladiza, debemos tener un cuidado muy especial por este motivo, procurando retirar las manchas de grasa cuando estas aparezcan en el suelo. Tenga cuidado de los gases peligrosos cuando trabaje en desarenadores cubiertos (Metcalf & Eddy, 1996).

La arena precisa de lavarse antes de su eliminación final. Ello es debido a que la arena recogida de los desarenadores posee una alta cantidad de materia orgánica que puede atraer insectos y roedores, además de provocar malos olores tras su descomposición.

La arena extraída de los desarenadores puede contener hasta un 50% de materia orgánica. El lavado de arena se realiza en equipos especializados: lavadores de arena, existen varios modelos en el mercado (López & Martín, 2015).

➤ **Modelo 1**

Se trata de un tornillo inclinado que separa la arena de la materia orgánica. El tornillo desemboca en una tolva donde es recogida la arena lavada. A continuación se muestra el modelo.

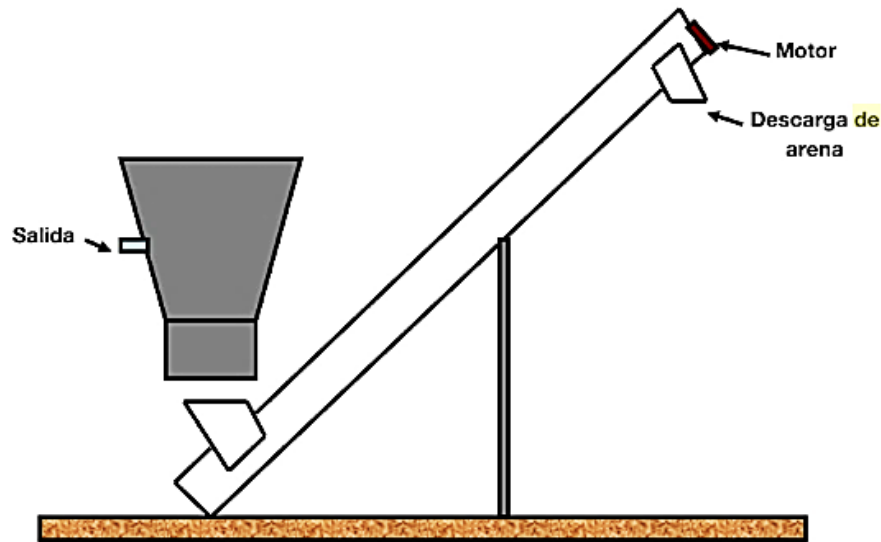


Figura 8. Lavado con tornillo inclinado (López & Martin, 2015).

➤ Modelo 2

Consiste en una criba que elimina la materia orgánica de la arena mediante un flujo de circula en ambas direcciones de forma alternativa (hacia arriba y hacia abajo del lecho). Ambos modelos se caracterizan por presentar un alto rendimiento. La descomposición de la materia orgánica produce gases como el metano o ácido sulfhídrico, responsable del mal olor (López & Martin, 2015).

2.5. HIDROCICLÓN

Un hidrociclón es un dispositivo de separación continua que utiliza la energía de la presión del fluido para crear movimiento rotacional, operan a bajas presiones. El fluido es dirigido tangencialmente dentro del dispositivo, el mismo que provoca el giro. Normalmente, un hidrociclón está dividido en dos partes: la sección cilíndrica y la sección cónica. El extremo de la sección cilíndrica (tapa) es cerrada con una placa a través de la cual pasa directamente un flujo vertical montado axialmente. La alimentación se produce a través de una abertura circular conectada tangencialmente a la parte superior de la sección cilíndrica, la sección cónica, que se encuentra unida a la cilíndrica, está abierta en su base y permite el flujo de las partículas más pesadas (Medina & Miranda, 2007).

Los hidrociclones están diseñados para la separación de partículas en líquidos. Estos

dispositivos son pequeños en tamaño, simples en estructura; No hay nada ajustable dentro de los hidrociclones. Además, son rentables y tienen un tiempo de residencia bajo (Svarovsky, 1984).

Los hidrociclones son dispositivos, figura 9, sin elementos móviles, que eliminan hasta el 98 % de partículas con peso específico superior al agua, es decir, minerales, y de diámetro superior a 0,1 mm. Tienen la gran ventaja de producir unas pérdidas constantes e independientes de la concentración de impurezas en el agua. Se deben instalar a la entrada del cabezal (Cadahía, 2005).

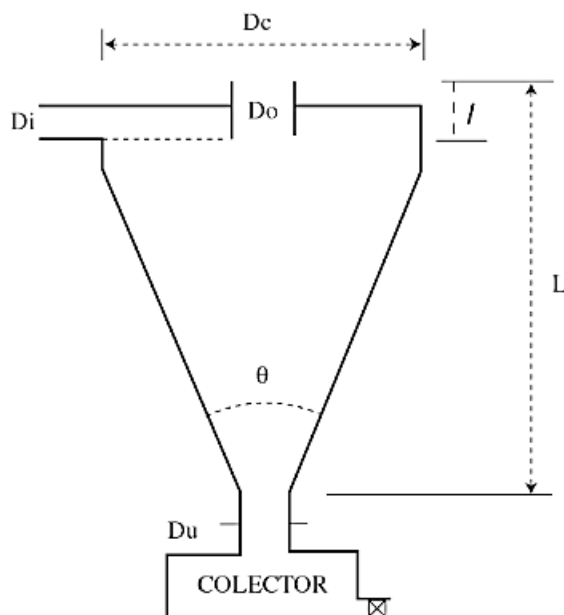


Figura 9. Hidrociclón (Cadahía, 2005).

Su poder de separación disminuye al aumentar el diámetro nominal y las pérdidas aumentan con el caudal. Por ello interesa utilizar un batería de hidrociclones en paralelo, más que un solo hidrociclón de mayor diámetro (Cadahía, 2005).

Los hidrociclones pueden utilizarse para proteger a otros equipos de la abrasión causada por las partículas sólidas circulando a alta velocidad, o para mejorar el rendimiento de otros procesos. Una aplicación típica de los hidrociclones es la separación de fangos y arenas muy concentradas (Lapeña, 1990).

Es un equipo de bajo costo, sin partes móviles, fácil de instalar y que requiere poco mantenimiento. El líquido que arrastra los sólidos entra por una boca a una cámara circular, conectada a un cono, cuyas paredes laterales forman un Angulo de 10 a 12° como se puede apreciar en la figura 10. Al adquirir el movimiento centrifugo las partículas sólidas van contra las paredes en donde descenden hasta el fondo, mientras el agua clarificada sale por la parte superior (Lapeña, 1990).

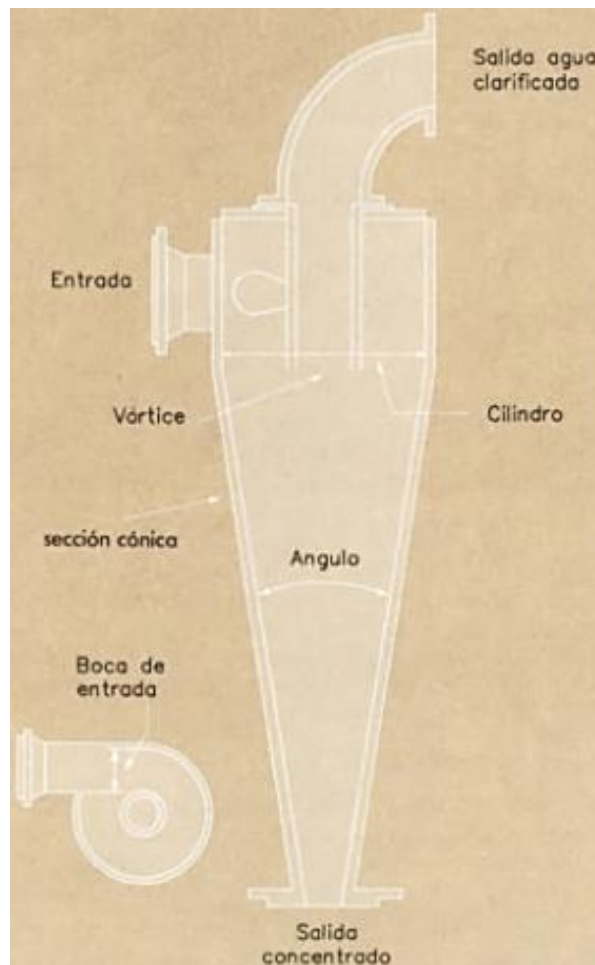


Figura 10. Hidrociclón y su partes (Lapeña, 1990).

2.5.1. Funcionamiento de un hidrociclón

Este se fundamenta en que la alimentación de la pulpa a suficiente presión, ingresa tangencialmente a la sección cilíndrica del hidrociclón por la parte superior. La fuerza centrífuga actuará sobre las partículas gruesas que son proyectadas siguiendo una trayectoria helicoidal

hacia el extremo inferior de las paredes del hidrociclón y luego descienden, donde son colectadas y descargadas por el ápice (Kelly & Spottiswood, 1990).

Mediante el efecto de la estrangulación del paso de la parte cónica inferior la pulpa rotante se separa en dos flujos, uno que se dirige a las paredes del hidrociclón y otro que asciende. De esta manera el material grueso o más pesado se concentra en las paredes, siendo expulsado por la parte inferior denominada ápice y el material más liviano por la parte superior llamado derrame. La gravedad específica juega un papel muy importante en la clasificación de las partículas, ya que controla la consistencia de la descarga del hidrociclón (Kelly & Spottiswood, 1990).

a) Entrada de material: En esta parte se controla la entrada de material, la velocidad de la pulpa y tiene la finalidad de pre-orientar a las partículas a su punto tangencial de contacto con las paredes del cilindro. (Paredes, 2018).

Existe alguna evidencia que el diseño de ingreso puede influenciar en la eficiencia de clasificación. La mayoría de los ingresos son rectangulares, pero el ingreso de la pulpa se puede hacer de dos formas: “Involuta” y “Tangencial” como se puede apreciar en la figura 11. El diseño “Involuta” con su radio de entrada más grande reduce la turbulencia y así mejora la clasificación y reduce el desgaste. (Paredes, 2018).

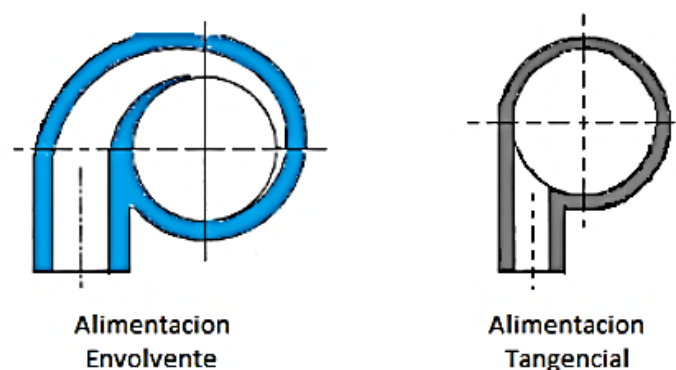


Figura 11. Tipos de ingreso al hidrociclón Paredes, (2018).

➤ **Derrame o rebose:** Es otra parte importante en la operación, ya que es el más crítico y su tamaño tiene influencia en la presión para un volumen determinado y generalmente se tiene que

entre más grande es su diámetro, mayor proporción de sólidos van al derrame y, por el contrario, si el localizador del vórtice tiene un diámetro pequeño significa un derrame fino con baja concentración de sólidos. Para todo tipo de pulpa, debe buscarse un balance óptimo con una dilución permitida entre el localizador del vórtice más grande y la presión más baja posible para el objetivo que se desee. (Paredes, 2018).

➤ **Ápice:** Su función es descargar el grueso, de tal forma que se obtenga su máxima densidad, por lo tanto, debe ser de tamaño adecuado para permitir la máxima salida de suelo en la forma cónica. (Paredes, 2018).

2.5.2. Zonas de operación de un hidrociclón

En la figura 12 se muestra un mapa de las zonas de influencia en un hidrociclón.

Zona A.- Predomina la pulpa no clasificada en la parte estrecha adyacente a la pared cilíndrica del ciclón.

Zona B.- Esta zona ocupa gran parte del cono del hidrociclón y contiene una gran cantidad de partículas gruesas. La distribución del tamaño es prácticamente uniforme y es similar al producto que se obtiene en el ápice.

Zona C.- En esta zona existe una gran proporción de producto fino, ubicada alrededor del localizador del vórtice y se extiende por debajo de la parte posterior.

Zona D.- A través de esta región se da la clasificación radialmente, así el tamaño de las partículas disminuye al máximo al estar más cerca del eje del hidrociclón (Paredes, 2018).

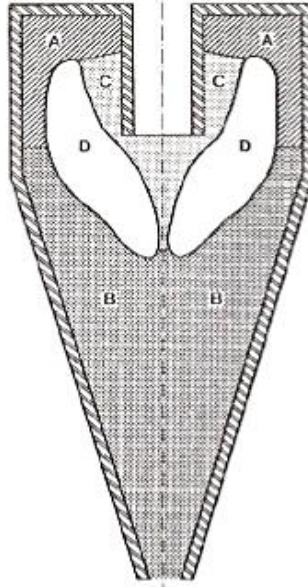


Figura 12. Diagrama de zonas de influencia de un hidrociclón (Paredes, 2018).

2.5.3. Patrones de Flujo

a) Numero de Reynolds

Existen algunas controversias si las condiciones de flujo en los hidrociclones son laminares o turbulentas. Para asumir el comportamiento de flujo pueden considerarse dos números de Reynolds. El primero vendría a estar relacionado con la partícula Re_p , indicando que ocurre un comportamiento de asentamiento laminar, pero también es necesario tomar un Reynolds para el hidrociclón mismo Re , que comprende una dimensión característica del hidrociclón, así como una velocidad característica. Estas son difíciles de seleccionar, pero la relación normalmente adoptada es según la ecuación 3.

$$Re = \frac{Dc * Vi * \rho_i}{\mu} \quad \dots (3)$$

Donde:

Re : Reynolds

Dc : Diámetro del hidrociclón (m)

Vi : Velocidad de entrada al hidrociclón (m/s)

ρ_i : Densidad de la pulpa (kg/m^3)

μ : Viscosidad de la pulpa (kg/(m.s))

Considerando este Re los valores típicos estarían en el intervalo de 10^4 a 10^6 , presentando un flujo de turbulento en el ingreso, sin embargo, este flujo turbulento no continuara dentro del cuerpo del hidrociclón pudiendo presentarse condiciones laminares. (Kelly & Spottiswood, 1990).

b) Flujos generales

El patrón de flujo más importante en el hidrociclón es la espiral dentro de más espirales las cuales giran en la misma dirección, este tipo de espirales son generados por la alimentación tangencial. Dentro del hidrociclón la velocidad del líquido o sólidos en un punto cualquiera puede descomponerse en tres componentes; la componente vertical o axial $V(V)$ y la componente radial $V(r)$ (Kelly & Spottiswood, 1990).

- **Velocidad vertical del líquido:** La componente vertical de velocidad indica la magnitud de las dos espirales, por lo tanto, se relaciona con la distribución volumétrica entre la descarga de inferior y el derrame (Kelly & Spottiswood, 1990).
- **Velocidad radial del líquido:** La componente de la velocidad radial es la corriente de líquido contra la cual deben asentarse las partículas a causa de la fuerza centrífuga si han de ser separadas en la descarga inferior (Kelly & Spottiswood, 1990). Las velocidades radiales situadas en la región que queda arriba de la base del localizador del vórtice deben tener fuertes corrientes orientadas hacia adentro a lo largo de la cubierta superior que resultan de las corrientes en corto circuito debajo de ésta, el componente puede estar orientado hacia fuera a causa de las corrientes turbulentas.

2.5.4. Diseño de ciclones

Los ciclones son un dispositivo de control de material particulado bastante estudiado, el diseño de un ciclón se basa normalmente en familias de ciclones que tienen proporciones definidas. Las principales familias de ciclones de entrada tangencial son: ciclones de alta eficiencia, ciclones convencionales y ciclones de alta capacidad. Los márgenes de la eficiencia de remoción para los ciclones están con frecuencia basados en las tres familias de ciclones, es decir, convencional, alta eficiencia y alta capacidad (Echeverri, 2006).

Las tablas 5, 6 y 7 presentan un resumen de las características de las principales familias de ciclones de entrada tangencial. La figura 13 identifica las principales dimensiones del ciclón de entrada tangencial. El diámetro del ciclón identifica la dimensión básica de diseño, todas las demás dimensiones simplemente son una proporción del diámetro del ciclón (Echeverri, 2006).

Tabla 5

Características de los ciclones de alta eficiencia

Dimensión	Nomenclatura	Tipos de ciclón		
		Stairmand	Swift	Echeverri
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1,0	1,0	1,0
Altura de entrada	a/Dc	0,5	0,44	0,5
Ancho de entrada	b/Dc	0,2	0,21	0,2
Altura de salida	S/Dc	0,5	0,5	0,625
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,5	0,4	0,5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1,5	1,4	1,5
Altura parte cónica	z/Dc	2,5	2,5	2,5
Altura total del ciclón	H/Dc	4,0	3,9	4,0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0,375	0,4	0,375
Factor de configuración	G	551,22	698,65	585,71
Número cabezas de velocidad	NH	6,4	9,24	6,4
Número de vórtices	N	5,5	6,0	5,5

Fuente: (Echeverri, 2006).

Tabla 6*Características de los ciclones convencionales*

Dimensión	Nomenclatura	Tipos de ciclón			
		Lapple	Swift	Peterson-whifby	Zenz
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1,0	1,0	1,0	1,0
Altura de entrada	a/Dc	0,5	0,5	0,583	0,5
Ancho de entrada	b/Dc	0,25	0,25	0,208	0,25
Altura de salida	S/Dc	0,625	0,6	0,583	0,75
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,5	0,5	0,5	0,5
Altura parte cilíndrica	h/Dc	2,0	1,75	1,333	2,0
Altura parte cónica	z/Dc	2,0	2,0	1,837	2,0
Altura total del ciclón	H/Dc	4,0	3,75	3,17	4,0
Diámetro salida partículas	B/Dc	0,25	0,4	0,5	0,25
Factor de configuración	G	402,88	381,79	342,29	425,41
Número cabezas de velocidad	NH	8,0	8,0	7,76	8,0
Número de vórtices	N	6,0	5,5	3,9	6,0

Fuente: (Echeverri, 2006).**Tabla 7***Características de los ciclones de alta capacidad*

Dimensión	Nomenclatura	Tipos de ciclón	
		Stairmand	Swift
Diámetro del ciclón	Dc/Dc	1,0	1,0
Altura de entrada	a/Dc	0,75	0,8
Ancho de entrada	b/Dc	0,375	0,35
Altura de salida	S/Dc	0,875	0,85
Diámetro de salida	Ds/Dc	0,75	0,75
Altura parte cilíndrica	h/Dc	1,5	1,7
Altura parte cónica	z/Dc	2,5	2,0
Altura total del ciclón	H/Dc	4,0	3,7
Diámetro salida partículas	B/Dc	0,375	0,4
Factor de configuración	G	29,79	30,48
Número cabezas de velocidad	NH	8,0	7,96
Número de vórtices	N	3,7	3,4

Fuente: (Echeverri, 2006).

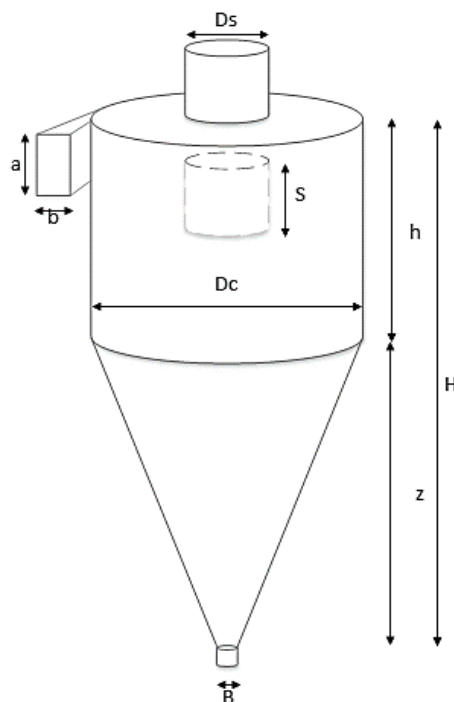


Figura 13. Dimensiones del ciclón (Echeverri, 2006).

2.5.5. Sistemas de control en un hidrociclón

El input del hidrociclón tiene parámetros variables, la granulometría de alimentación tiene un diámetro máximo aproximado de $150\ \mu\text{m}$, desde la bomba centrífuga la pulpa llega al hidrociclón con una presión que varía entre 345 y 700 kPa, y con una velocidad que también debe ser controlada, y varía entre 3,7 y 6,1 m/s, estos valores son modificados con el fin de mantener la presión en el núcleo por encima de los 30 kPa, presión mínima para mantener la granulometría de salida por el vortex en el tamaño deseado (Barrera, Urrutia, & Tolvet, 2010).

Para poder mantener la granulometría de salida en los niveles deseados, se determina el valor deseado para el d50C, lo cual equivale al diámetro con el cual el 50% de probabilidades de salir por el Overflow. El valor del d50c es particularmente importante ya que es el parámetro más controlable para obtener en el Overflow partículas de la granulometría deseada.

El d50c tiene directa relación con el tamaño del hidrociclón, de hecho, un valor estimado del tamaño de partícula que un hidrociclón puede seleccionar, se puede calcular a partir de la ecuación (4):

$$d50c = 2,84 \times D^{0,66} \quad \dots (4)$$

Este valor del d50c corresponde a un valor base, un estimado del valor que puede lograr el hidrociclón, y sirve para revisar si el tamaño del hidrociclón es el adecuado. En esta ecuación corresponde al diámetro del hidrociclón en centímetro, con esto el sistema de control puede modificar las variables manipulables sobre la marcha, con el fin de mantener la granulometría del Overflow en el tamaño deseado (Barrera, Urrutia, & Tolvet, 2010).

2.5.6. Cálculo del d50c

El punto de corte al 50% denominado como d50c es el parámetro más importante para describir el rendimiento del hidrociclón, se ha hecho intentos para correlacionarlo con las variables de operación y de diseño. Existen varios métodos para calcular el d50c del Overflow del hidrociclón sin embargo el uso del método empírico Propuesto por Krebs Engineers es más rápido y fácil de usar que otros métodos (Segura, 2009).

a) Método empírico de Krebs

En este método se usa la tabla propuesta por Krebs Engineers para hallar el d50c con el % de malla requerido en el Overflow del hidrociclón. (Segura, 2009).

Tabla 8

Factores de relación de d50c de Overflow

% de partículas pasantes en Overflow	Factor
98,8	0,54
95,0	0,73
90,0	0,91
80,0	1,25
70,0	1,67
60,0	2,08
50,0	2,78

Fuente: (Segura, 2009).

b) Método de Plitt

La ecuación de d50c es muy confiable, puede ser usada para hacer simulaciones y para hallar el Dc de un hidrociclón. La ecuación es:

$$d50c = \frac{k * (D)^{0,46} * (Di)^{0,6} * (Do)^{1,21} * e^{0,063 * \%v/vinlet}}{(Du)^{0,71} * (Hc)^{0,38} * Q^{0,45} * (G.E - 1)^{0,5}} \quad \dots (5)$$

Donde:

d50c : Tamaño de corte corregido (µm)

Dc : Diametro del hidrociclón (pulg)

Di : Diametro del inlet (pulg)

Do : Diametro de overflow (pulg)

Du : Diametro de underflow (pulg)

Hc : Altura del hidrociclón (pulg)

Q : Flujo de pulpa del inlet (pie³/min)

G.E : Gravedad específica del mineral

K : Constante de Plitt (35)

%V/V_{inlet}: Porcentaje de solidos (en volumen) del inlet

c) Método matemático de Krebs

Este método hace una interacción de con todos los “Dc” y todas “P” de operación. El método matemático Krebs Engineers consiste en comparar el % de solidos requerido con el % de solidos obtenido de cada combinación Dc y P simulada; de esta comparación se elige el hidrociclón a usar. Las formulas son:

$$\%v/vinlet = 50 - \frac{40}{\left[\frac{X_{95}}{16,098 * \left[\frac{1,65}{(G.E - 1)} \right]^{0,485} * \left[\frac{10}{P} \right]^{0,252} * Dc^{0,467}} \right]^{0,5584}} \quad \dots (6)$$

$$\%W/Winlet = \frac{100 * G.E * (\%V/Vinlet)}{[(100 + (\%V/Vinlet) + (G.E - 1))]} \quad \dots (7)$$

Donde:

$\%V/V_{inlet}$: Porcentaje de solidos (en volumen) del inlet

$\%W/W_{inlet}$: Porcentaje de solidos (en peso) del inlet

G.E : Gravedad específica del mineral

X95 : Tamaño por el que pasa el 95% de los sólidos del overflow (μm)

P : Presión del inlet (psi)

Dc : Diametro del hidrociclón (pulg)

d) Fórmulas gravimétricas

Densidad de pulpa

$$\check{r} = \frac{100}{100 - \% \frac{W}{W} * [1 - \frac{1}{G.E}]} \quad \dots (8)$$

Donde:

$\check{r}$: Densidad de pulpa (g/mL)

G.E : Gravedad específica del mineral

$\%W/W_{inlet}$: Porcentaje de sólidos (en peso) del inlet

Porcentaje de sólidos en volumen

$$\%V/V = \frac{100 * (\check{r} - 1)}{(G.E - 1)} \quad \dots (9)$$

Donde:

$\check{r}$: Densidad de pulpa (g/mL)

G.E : Gravedad específica del mineral

$\% V/V$: Porcentaje de sólidos (en volumen)

Todas estas fórmulas se usan para el cálculo del 80 % de malla pasante en el Overflow para obtener partículas de 0,071 mm de tamaños, más usada en procesamiento de minerales. Los cálculos están en el Anexo 2.

2.5.7. Eficiencia de separación de hidrociclón

La eficiencia de la separación de hidrociclones está asociada con el tipo y / o diseño del hidrociclón con su aplicación relacionada y cómo se opera. Por lo tanto, no es una característica del hidrociclón en sí, sino una eficiencia fraccional (Rietema & Verver, 1961). Se determina con la ecuación (10).

$$E = \frac{\text{Flujo másico UNDERFLOW (kg/s)}}{\text{Flujo másico INLET (kg/s)}} \times 100 \quad \dots (10)$$

Donde:

UNDERFLOW : Salida inferior del hidrociclón

INLET : Alimentación al hidrociclón

2.5.8. Aplicaciones del hidrociclón

Los hidrociclones tienen múltiples usos en las industrias como: en la petroquímica, alimentarias, en cabezal de riesgo para fertirrigación; sin embargo, el uso más frecuente lo hacen en la industria de procesamiento de minerales. (Doroteo, 2010).

El hidrociclón se puede usar como espesador, clasificador y separador. En un tiempo relativamente breve se ha convertido en una pieza de equipo establecida para un gran número de procesos industriales, como en este caso, en la implementación del sistema de lavado de suelos asistido por surfactantes (Doroteo, 2010).

Generalmente los hidrociclones son empleados para las siguientes operaciones:

- Espesamiento de pulpas de tamaño de grano muy fino, suspensiones, etc.
- Deslame
- Clasificación selectiva
- Concentración o clasificación para enriquecimiento de fracciones finas de minerales pesados

Las ventajas principales de un hidrociclón se centran en torno a su sencillez, su tamaño reducido y el bajo costo en comparación con otros equipos de separación. Debido a que un hidrociclón

produce una alta acción de corte, puede ser superior en el tratamiento de material floculado y de suspensiones de viscosidad aparente relativamente alta. Esto se ha atribuido a una dependencia de la viscosidad del líquido más que de la viscosidad de la pulpa, aunque algunos autores mencionan que puede ser debida a la capacidad del hidrociclón para vencer el esfuerzo cortante crítico que ocurre con las pulpas de Bingham de naturaleza plástica. Algunas de las aplicaciones en minería, son los procesos de flotación para concentrar minerales de Pb, Cu, Zn, Ag, entre otros (Doroteo, 2010) .

2.5.9. Clasificación del hidrociclón

En forma general, los hidrociclones se clasifican en: hidrociclón simple y multiciclón. Los simples poseen una sola unidad, son de gran diámetro y para aumentar su eficiencia de colección o su capacidad, se realizan arreglos en serie, paralelo, o se instala una recirculación; por el contrario, los multiciclones son la unión en paralelo de varias unidades de menor diámetro en una cámara rectangular, logrando así mayores eficiencias (Arismendy, 2013).

➤ Hidrociclón simple

Normalmente se utilizan este tipo de hidrociclones para realizar diámetros de corte entre 150 μm , los más utilizados son los de fondo plano, los cuales el lecho “fluido” creado en la zona inferior de los ciclones de cono ancho, no es un lecho estacionario, sino que está dotado de un movimiento de convención alrededor del núcleo central, lo cual favorece la reclasificación de partículas, ligeras o de pequeño tamaño mal clasificadas, que en su movimiento constante son en algún momento arrastradas por el torbellino interior o principal, siendo finalmente evacuadas por el rebose superior. Este principio no puede ser aprovechado en un ciclón cónico, porque un aumento de la altura del lecho provocaría rápidamente la obstrucción de la boquilla de descarga, debido a la fricción de las partículas con la pared cónica (efecto silo), pero si puede ser desarrollado alejando la pared del orificio de descarga, para lo cual se elimina la zona cónica prolongando al mismo tiempo la zona cilíndrica y “cerrando” el ciclón con un fondo horizontal o casi, con un ángulo comprendido entre 160° - 180° . El lecho fluido creado en el fono del ciclón actúa como un “colchón”, amortiguando las variaciones en la alimentación, tanto en caudal como en concentración de sólidos (Arismendy, 2013).

➤ Arreglo multiciclón

Para hidrociclones con menor diámetro dan para la misma caída de presión una mayor eficiencia. En procesos de clarificación o clasificación a bajos tamaños de corte son requeridos, bancos de hidrociclones con diámetro pequeño son usados en paralelo para tratar caudales elevados esto se puede hacer ya sea por una tubería colectora que conecta varios hidrociclones individuales en paralelo, o cuando un gran número de pequeñas unidades se va utilizar, encerrándolos en una caja única con cámaras de descarga comunes, tales unidades puede ser unidas entre ellas en paralelo para producir columnas capaces de tratar flujos muy altos. Los arreglos disponibles pueden ser divididos en cuatro tipos básicos como se muestran en la figura 14, con pequeñas variaciones dentro de cada tipo, los primeros dos tipos a) y b), son arreglos lineales mientras que los otros dos, c) y d), son circulares, estos arreglos prestan una mejor distribución uniforme de la alimentación debido a que cada unidad es idéntica de la tubería y se alimenta en una cabecera central, c) es el arreglo más común que se presentan en la industria aquí los hidrociclones están en forma vertical o ligeramente inclinados, para hidrociclones con tecnología muy elevada y para tratar cierto tipo de materiales y requieren una inercia en su material, es común ver hidrociclones hechos altos grados de acero inoxidable montados en tubos como se muestra en el numeral e) de la figura 14 (Arismendy, 2013).

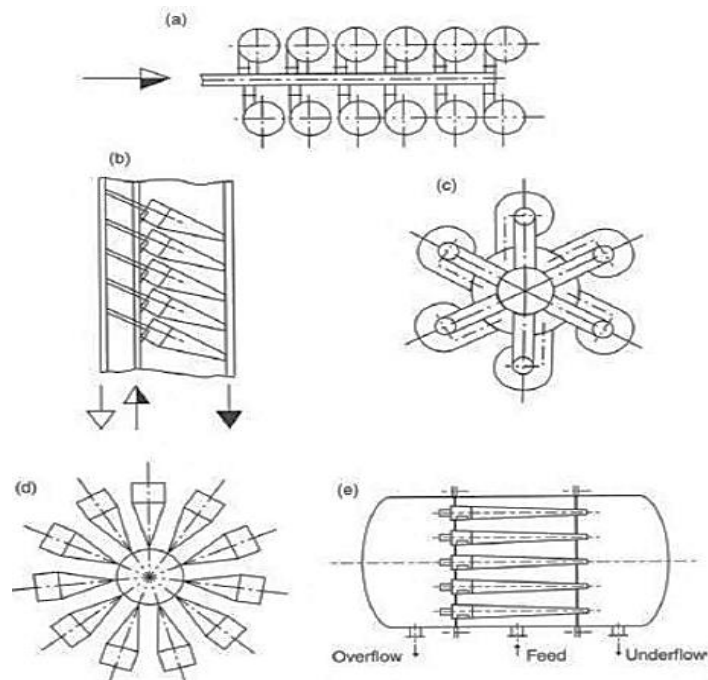


Figura 14.Arreglo multiciclón (Arismendy, 2013).

2.6. MARCO LEGAL

Las normatividades que dan fundamento, y que son emitidas bajos los entes o las autoridades competentes y que van ligadas a este trabajo fueron:

Entre las que se encuentra el DECRETO SUPREMO N° 003-2010-MINAM, donde establece los Límites Máximos Permisibles para los efluentes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales domésticas o municipales.

RESOLUCIÓN MINISTERIAL N° 128-2017-VIVIENDA, allí se reglamentan todas las condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final; en el capítulo 1 y artículo 5 están las disposiciones generales: como lodo generado en la PTAR, plan de minimización y manejo de residuos sólidos, residuos sólidos de saneamiento, sólidos totales, etc.

DECRETO SUPREMO N° 022-2009-VIVIENDA, adopta la modificación de la Norma Técnica OS.090 “Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales del reglamento Nacional de edificaciones, donde la Norma OS.090 está relacionada con las instalaciones que requiere una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales municipales y los procesos que deben experimentar las aguas residuales antes de su descarga al cuerpo receptor o a su reutilización.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se hace mención de la ubicación geográfica del periodo y lugar donde se ha realizado la investigación, universo y muestra e identificación de actividades programáticas.

El tipo y nivel de investigación fue:

TIPO DE INVESTIGACIÓN: Aplicativo

NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Explicativo

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y LUGAR DE TRABAJO

La investigación se ha realizado en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá”. Utilizando como unidad de investigación el desarenador de la etapa de pre-tratamiento y para los análisis respectivos de la investigación el laboratorio de análisis fisicoquímico de la PTAR.

La PTAR “La Totorá” está ubicada en el distrito de Jesús Nazareno, provincia de Huamanga, departamento de Ayacucho situada a una altitud de 2850 msnm.

La instalación del hidrociclón a escala piloto, se ha realizado entre el desarenador y el lecho de secado de arenas de la planta de tratamiento de aguas residuales.

En la figura 15 se muestra la ubicación del lugar de la investigación.

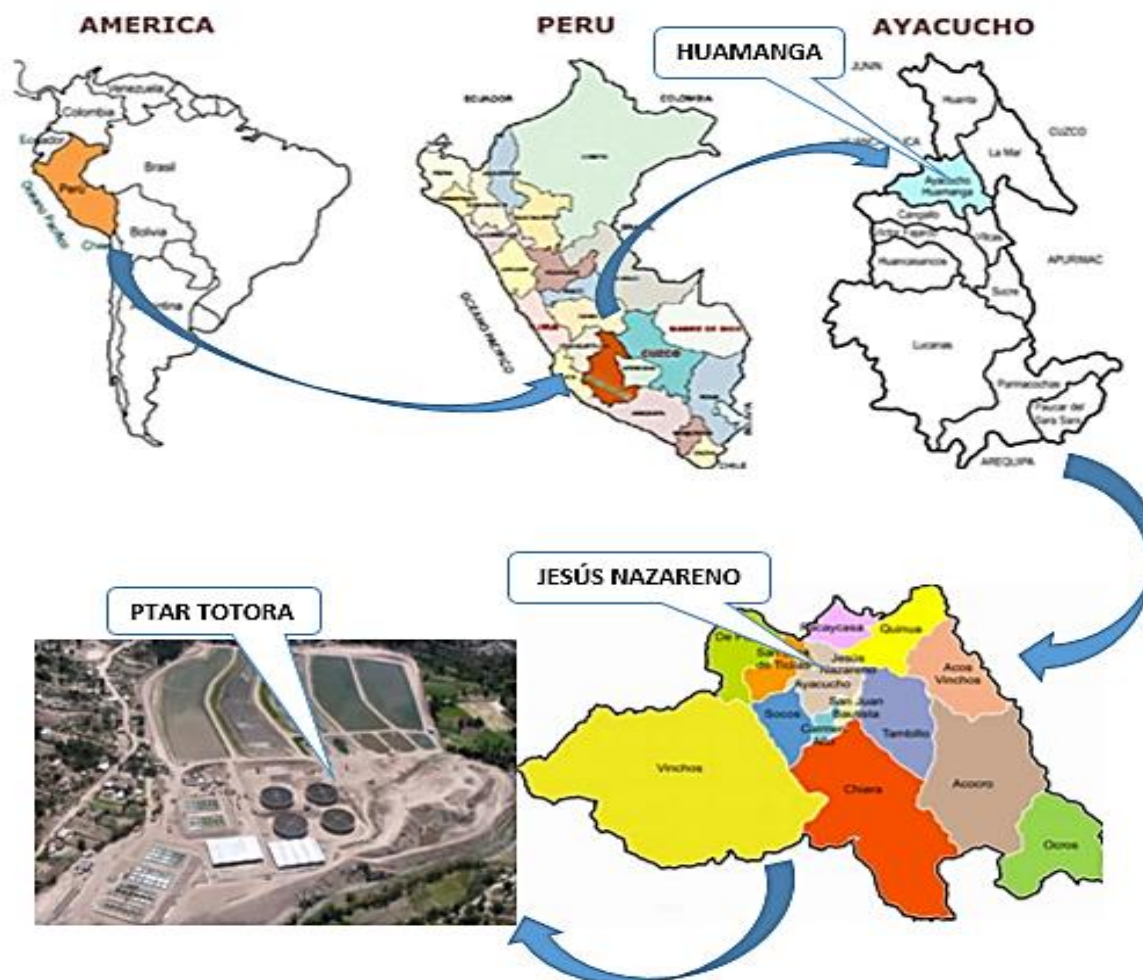


Figura 15. Ubicación geográfica del lugar de la investigación

3.2. LUGAR Y PERIODO DE DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

La investigación se ha realizado durante seis meses, de Julio a diciembre 2018.

En el mes de agosto se ha realizado la evaluación del desarenador actual de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “La Totorá”, en el mes de octubre se ha realizado el diseño y construcción del hidrociclón y en el mes de noviembre con la instalación del hidrociclón y los componentes que constituyen el sistema de remoción, realizando el arranque y puesta marcha en noviembre del 2018. Se ha realizado evaluación diaria 9:00 a.m. de los parámetros de operación del hidrociclón en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” de la actual de SEDA AYACUCHO.

La instalación del hidrociclón a escala piloto, esta situada en la etapa de pre-tratamiento de la PTAR “La Totorá” exactamente entre el desarenador y el lecho de secado de arenas, figura 16.

La investigación se ha desarrollado en 5 etapas:

- Etapa de evaluación de la unidad de desarenador.
- Etapa de diseño, construcción e implementación del hidrociclón.
- Etapa de arranque y puesta de operación del hidrociclón.
- Etapa de evaluación de los parámetros de operación.
- Etapa de procesamiento de información.

A continuación se muestra la figura 16 , correspondiente a la ubicación de la instalación del hidrociclón.



Figura 16. Ubicación de la instalación del equipo de hidrociclón

3.3. UNIVERSO Y MUESTRA

El agua residual contenidos de sólidos en suspensión utilizada en la investigación se ha captado del desarenador de la PTAR, previo al ingreso a la caja de distribución, con un caudal promedio 8 L/s en flujo continuo, cuyo detalle de la instalación se describe más adelante, en el ítem de las instalaciones del equipo de hidrociclón.

Las arenas tanto como gravas y finas en las aguas residuales que ingresa a la PTAR “La Totorá”, pasa por tratamientos preliminares conformado por rejillas gruesas de acero de 30° de inclinación

y con una separación de 25 mm entre barras para retener gravas, dos rejillas mecanizada escalonada de rejas finas de acero dispuesta en paralelo, con inclinación en 56° y con una separación de 6 mm entre rejas y finalmente a los dos desarenadores horizontales que solo llegan arenas finas, estos desarenadores son rectangulares de 1,20 m de ancho cada uno , con 30 m de longitud y con una altura de profundidad de 2,50 m donde la acumulación de los sólidos inorgánicos llegan una altura promedio de 1,15 m.

El desarenador de la PTAR “La Totorá” tiene como función retener arenas con granulometría superior 0,15 mm de diámetro y está manteniéndose a la velocidad longitudinal de 0,25 a 0,30 m/s por sedimentación.

Finalmente, las arenas acumuladas en esta unidad, son retiradas al lecho de secado en forma de barro, para posterior secado mediante el proceso de lixiviación donde el agua mediante filtros se separa del lecho de secado desembocando a la etapa primario para seguir su tratamiento con el resto de las aguas residuales.

Los sólidos y/o arenas una vez secadas en el lecho de secado inicialmente echadas con cal para disminuir los malos olores son retirados al campo de depósito de sólidos, para dejar limpio el lecho de secado, disponible para aceptar otra cantidad de sólidos y/o arenas retirados de la unidad de desarenador.

3.4. IDENTIFICACIÓN DE ACTIVIDADES PROGRAMÁTICAS

Se determina cuáles son los pasos a seguir y las técnicas que se ha utilizado durante el desarrollo metodológico del presente trabajo de investigación sobre diseño y construcción de un hidrociclón a nivel piloto para la remoción de las arenas residuales en la unidad de desarenador de la PTAR “La Totorá”.

El proceso de desarrollo experimental comprende los siguientes pasos que se muestran en la figura siguiente:

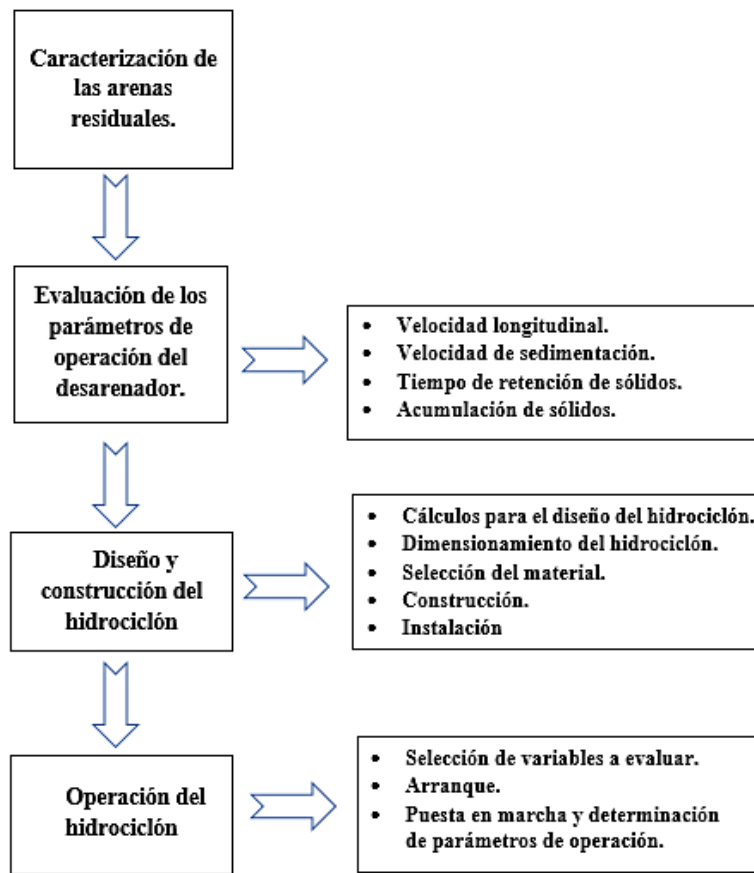


Figura 17. Estructura de desarrollo experimental de la investigación

- Caracterización de las arenas residuales
- Evaluación de los parámetros de operación del desarenador
 - Determinación de la velocidad longitudinal
 - Determinación de la velocidad de sedimentación
 - Determinación del tiempo de retención de sólidos
 - Acumulación de todos los sólidos
- Diseño y construcción de los componentes del hidrociclón y su colector
 - Selección de materiales
 - Cubicación (cuantificación) de los materiales
 - Cortes, rolado de los materiales
 - Soldadura y acabado de los componentes
 - Ensamblado de los componentes
 - Pruebas hidráulicas “sin carga”

- Pruebas hidráulicas “con carga”
- Instalación del sistema de captación
- Instalación del sistema de conducción
- Instalación de la electrobomba sumergible
- Instalación del hidrociclón
- Puntos de muestreo
- Afluente del hidrociclón
- Efluente del hidrociclón
- Procedimiento de toma de muestras
- Puesta en marcha del hidrociclón
- Operación y mantenimiento del hidrociclón
- Técnicas de análisis de laboratorio
- Resultados de los parámetros de evaluación
- Análisis y discusión de resultados

3.5. DESCRIPCIÓN DE PASOS Y TÉCNICAS DE EVALUACIÓN

3.5.1. Caracterización de las arenas residuales

La caracterización de las arenas residuales se ha realizado con fines de información para luego determinar los parámetros de evaluación del desarenador y para el diseño del hidrociclón y su respectiva evaluación, con la ayuda de los estudios realizados especialmente de la granulometría, gravedad específica y densidad aparente. La caracterización fue tanto físicas y químicas.

3.5.2. Evaluación de los parámetros de operación del desarenador

Primero se ha determinado que parámetros deben de evaluarse en esta unidad, luego si estos parámetros están funcionando correctamente como los establece la (O.S.090). Los parámetros a evaluar fueron:

- Velocidad longitudinal
- Velocidad de sedimentación
- Tiempo de retención de sólidos

- Acumulación de todos los sólidos

Los resultados de esta evaluación se detallan en el capítulo de resultados experimentales.

3.5.3. Diseño y construcción de los componentes del hidrociclón y su colector

Para el diseño del hidrociclón lo primero fue estudiar a las arenas residuales especialmente las características físicas y la cantidad de flujo de alimentación de caudal para el diseño del equipo. Se ha plasmado en dibujo el diseño y se ha llegado a ver el modelo para la construcción, esta parte se describe de manera ordenada y detallada en el capítulo de diseño y construcción.

➤ Selección de materiales

Se ha elegido el tipo de material a usar en la construcción, teniendo en cuenta el costo y accesibilidad, por tal motivo se ha utilizado planchas metálicas de Hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor tanto para el hidrociclón y para su colector y tubos de Hierro galvanizado para el módulo de soportes del equipo.

➤ Cubicación de los materiales

Una vez ya fijados los parámetros y variables para el diseño del equipo se ha cuantificado las medidas de cada componte del equipo, la parte cilíndrica, parte cónica, la entrada tangencial, tapa superior, el cono de salida y por último el cono del colector.

➤ Cortes, rolado de los materiales

medidas las piezas metálicas del equipo, se ha realizado los cortes de las planchas y luego se procedió al rolado de estas planchas para llevar a la forma cilíndrica y cónica.

➤ Soldadura y acabado del componente

Una vez lista los componentes con sus respectivas formas tanto cilíndrica y cónica, la entrada rectangular y la tapa, se ha unido los componentes mediante la soldadura dando un acabado a dicha unión de componentes, en el capítulo de diseño y construcción se puede ver con más detalle.

➤ **Ensamblado de los componentes**

Una vez culminada con la unión de los componentes se procedió al ensamblado del hidrociclón y su colector de arena.

➤ **Pruebas hidráulicas “sin carga”**

Se ha realizado pruebas de fisuras con agua, para ver si en la soldadura hubo imperfecciones que no se llegaron a terminar bien, una vez encontradas dichas imperfecciones se volvieron a la etapa de soldadura.

➤ **Pruebas hidráulicas “con carga”**

Terminada todas las etapas de construcción se ha realizado las pruebas para ver su funcionamiento, para ello se ha llenado un bidón de 100 L con agua contenido de arena en suspensión. Esta prueba tuvo mucha importancia porque ha permitido detectar los inconvenientes que se puedan darse en la etapa de implementación y evaluación.

3.5.4. Instalación del sistema de captación

La captación del agua residual con contenido de sólidos residuales para la alimentación al hidrociclón se ha realizado desde el primer canal horizontal del desarenador a los 25 m de longitud y 0,60 m del punto medio ancho del canal, donde la electrobomba fue sumergida para su respectiva captación, la electrobomba se ha protegido con mallas para retener restos más grandes como bolsas, guapos, restos de carnes, etc. Ya que este podría ocasionar trabas al ducto de succión de la electrobomba.

3.5.5. Instalación del hidrociclón

Para la instalación del hidrociclón, lo primero que se tuvo que instalar fue una estructura rústica de soporte de madera de 2 pulgadas de diámetro con techo de calamina para proteger de la lluvia y otras circunstancias de deterioro, luego va el módulo o soporte para sostener el hidrociclón, esto fue construido de hierro galvanizado de ½ pulgada de diámetro que tiene forma de un trípode con una altura de 1,60 m desde el nivel del suelo concreto.

La base de la plataforma ha sido hecha de concreto de 0,8 m², donde se ha instalado el soporte

fijado a 5 cm del suelo para tener mayor estabilidad y seguridad a la velocidad y caudal que proporciona la electrobomba.

Una vez instalado el módulo, se ha empezado con la instalación del hidrociclón y su colector de arena, a una altura de 30 cm sobre la superficie del concreto, que han sido sujetados con abrazaderas tanto para el hidrociclón y para su colector de arena.

En el sistema de conducción de entrada al hidrociclón, se ha instalado accesorios como T PVC para el By pass y para la conducción directa al hidrociclón, dos válvulas para cada salida tanto para el By pass y para la conducción directa, con fines de mejorar la calibración del caudal de ingreso, después de la válvula instalado en la conducción directa al ingreso del hidrociclón, se ha instalado una unión universal para poder retirar todo el sistema de conducción de entrada al hidrociclón para evitar cualquier problema que pueda pasar durante el funcionamiento del equipo y en este punto también se ha medido, regulado el caudal de alimentación, todos los accesorios como la tubería de alimentación son de 2 pulgadas.

Por la parte superior del hidrociclón tiene una salida cónica de 3 pulgadas la cual tiene una reducción campana a 2 pulgadas conectando un tubo PVC para transportar el flujo de agua residual limpia de arena a la entrada de la caja de distribución, donde se ha realizado el muestreo a la salida de esta tubería para saber la composición de arena en esta salida.

Por la parte inferior del hidrociclón en la salida del colector de arena se ha instalado una válvula de 2 pulgadas para regular la continuidad del flujo de la arena que va siendo acumulada en el colector, la arena colectada se ha retirado a un recipiente, el cual fue trasladado al lecho de secado de arenas.

3.5.6. Instalación de la electrobomba sumergible

La electrobomba fue sumergida incluida su soporte de 20 cm² que lo sostiene a una altura 1,05 m desde la superficie del desarenador para su mejor succión, con apoyo de 4 varillas de 1,28 m colocadas de forma diagonal frente a frente del canal para su estabilidad, que los sostendrán desde la base del soporte truncadas hasta el concreto de la superficie del desarenador, como se

puede apreciar en la figura 18. La tubería de succión tiene una altura de 1m y el tubo horizontal tiene 2,80 m de distancia de tubería hasta el ingreso del hidrociclón, la potencia de esta electrobomba es 1 hp con rodete de acero especial para bombear sólidos en suspensión y con caudal suficiente para poder conducir dicha solución. El caudal y la velocidad necesario para el funcionamiento del hidrociclón fue seleccionado de acuerdo a la distancia requerida por tal motivo se ha seleccionado una distancia total de 3,80 m, interpolando desde 3,5 a 5 m como se puede ver en el Anexo 3.

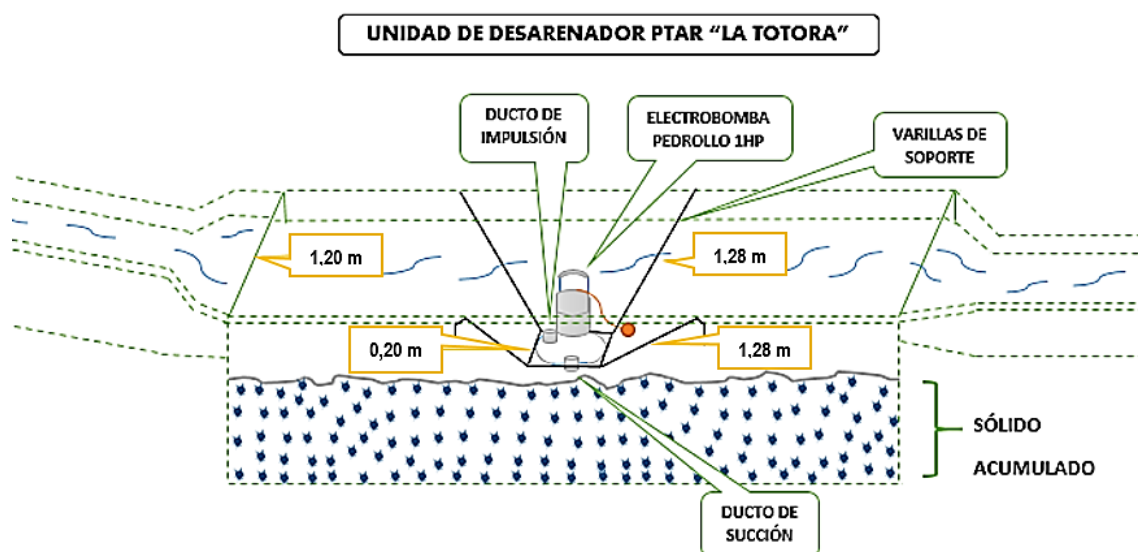


Figura 18. Instalación de la electrobomba sumergible

Antes del funcionamiento de la electrobomba se ha tenido que conectar puesta a tierra porque estuvo sumergida en el agua residual.

Para lo cual se ha construido un pozo a tierra de 60 cm de profundidad, con una varilla de hierro con alambres de cobre colocadas en espiral.

3.5.7. Instalación del sistema de conducción

El agua residual contenidos de sólidos suspensión se ha captado desde el desarenador conectado con una tubería PVC instalado a la electrobomba para luego ser transportado directamente al hidrociclón. Con un tubo de alimentación de 2 pulgadas PVC de diámetro hasta la entrada al

hidrociclón, después de ésta el agua limpia de sólidos desemboca a la entrada de la caja de distribución para los Tanque Imhoff.

3.5.8. Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo se han definido priorizando su importancia para el grado de remoción, como en la entrada, salida superior y salida inferior del equipo de hidrociclón.

➤ Afluente del hidrociclón

El ingreso del agua residual contenido de sólidos en suspensión, en este punto nos describe el estado y las características del agua residual contenido de sólidos antes de iniciar el proceso en el hidrociclón, nos proporcionan una línea de base para la determinación del grado de remoción del sistema. Proviene del primer canal horizontal del desarenador ha sido captada de manera continua con un caudal promedio de 8 L/s de agua residual con sólidos en suspensión. Los sólidos como arenas, gravas pasaron por un tratamiento preliminar compuesta por cámara de rejillas, luego pasa por las rejillas escalonadas de 6 mm de limpieza automática y finalmente llega al desarenador lugar donde se ha acumulado con un tamaño máximo de 1 mm de diámetro de arenas, es de aquí que se ha tomado la alimentación para el hidrociclón.

➤ Efluente del hidrociclón

Las muestras se han tomado en dos puntos tanto para la salida superior (OVERFLOW) y salida inferior (UNDERFLOW) del hidrociclón.

La muestra del primer punto del efluente se ha tomado a la salida superior del hidrociclón en el extremo del tubo PVC que conecta a la entrada de la caja de distribución de los Tanques Imhoff. Esta muestra se ha utilizado para determinar contenidos de sólidos en suspensión que contiene el agua residual que sale del hidrociclón.

El muestreo se ha realizado en el segundo punto a la salida de la parte inferior del hidrociclón ósea a la salida del colector que nos da a conocer la salida de los sólidos en su mayor proporción arenas, esto permitió determinar el grado de remoción del hidrociclón o remoción de arena en relación a la arena contenida en el flujo de alimentación al hidrociclón.

➤ **Procedimientos de toma de muestras**

Para la toma de muestras se ha utilizado botellas de vidrio de 475 mL con tapa hermética. La toma de muestras se ha realizado manualmente en los puntos de muestreo ya fijados a la entrada y salidas del hidrociclón, los frascos están debidamente rotulados para identificar la correspondencia de la muestra. Una vez finalizado la evaluación del hidrociclón, los frascos con muestras se han llevado inmediatamente al laboratorio de la PTAR para realizar los análisis de los resultados obtenidos.

Para la toma de muestras de los sólidos a la salida del colector se han empleado baldes con medida de 21 L, debidamente rotulados.

3.5.9. Puesta en marcha del hidrociclón

El proceso se ha empezado con la captación de las aguas residuales contenidos de sólidos en suspensión con la ayuda de la electrobomba que fue sumergida en el primer canal horizontal del desarenador, perteneciente al tratamiento preliminar de la PTAR. La muestra captada fue succionada a través de tubos PVC de 2 pulgadas al hidrociclón, previa regulación del caudal con los accesorios instalados antes del ingreso al hidrociclón.

El arranque del hidrociclón se ha iniciado una vez revisado las instalaciones y correcto situado del equipo que tiene que ser vertical para su funcionamiento con eficiencia.

El agua residual contenidos de sólidos en suspensión ingresa a la parte cilíndrica del hidrociclón en forma tangencial para que la fuerza gravitacional sea sustituida por la fuerza centrífuga generado por el giro de la corriente del fluido en el interior del hidrociclón, dando como resultado que los sólidos se desplacen hacia la pared del cono, con una trayectoria espiral descendente, hasta que caen en el deposito colector. Mientras el agua limpia de sólidos ha de salir del hidrociclón a través del tubo situado en la parte superior.

La válvula de salida en el Underflow (parte inferior) del colector se tuvo que cerrar por unos segundos para que los sólidos en el interior del colector estén acumulándose y también de segundos se ha abierto dicha válvula poco a poco buscando la continuidad de la caída de sólidos

al recipiente, el llenado de sólidos en el colector está diseñado para una hora de operación. Los sólidos luego de ser retirados del colector se llevaron al lecho de secado para su posterior secado.

3.5.10. Operación y mantenimiento del hidrociclón

Durante la operación del hidrociclón se ha prestado más atención a la regulación del caudal de alimentación, ya que el caudal alimentado tiene que ser constante, por esta razón se ha realizado varias mediciones de caudal. Siendo a las 9.00 a.m hora de evaluación de todos los días de la semana. Si bien, inicialmente se ha regulado el caudal de ingreso a la entrada al hidrociclón a través de las válvulas que lo componen, esta se rectificó, considerando el By Pass como punto de regulación del caudal de ingreso al hidrociclón, procedimiento que se ha considerado con la finalidad de obtener mayor exactitud en la medición de caudal de ingreso.

Si es bien es cierto que el hidrociclón ha sido diseñado para un caudal de 8 L/s, pero la regulación del caudal de ingreso para la evaluación del equipo se ha realizado desde 6 L/s hasta 9 L/s con tiempo de operación de una hora, debido a que el caudal máximo que brinda la electrobomba es 9.1660 L/s.

Procedimiento para regular el caudal de alimentación:

- La medida del caudal de alimentación se ha realizado antes del accesorio (unión universal) antes del ingreso al hidrociclón, para determinar el caudal en ese instante se ha regulado el caudal deseado con la ayuda de la válvula de By-pass y la válvula de entrada directa al hidrociclón.
- Para la determinación del caudal se ha utilizado un balde de 21 L debido al gran caudal alimentado, la muestra fue tomada en 2 segundos. Para dar como resultado el caudal con la división entre volumen y el tiempo.

La presión de ingreso al hidrociclón se ha podido apreciar en el manómetro instalado a la entrada de la parte cilíndrica del hidrociclón.

El mantenimiento de todo el sistema se ha realizado ni bien finalizado la evaluación, debido a que los sólidos fueron impregnados en el hidrociclón, colector de arena, en la electrobomba, en las tuberías, accesorios y en las válvulas. Éste último en especial ya que se puso más duro al

momento abrir y cerrar en dicha evaluación y también dando más importancia al colector de arenas ya que debe estar limpia para su mejor y fácil retiro continuo de sólidos.

La electrobomba ha sido protegida con mallas con fines de retener partículas que no sean sólidos en suspensión como bolsas de plástico, guaipes, etc. El mantenimiento fue muy trabajoso debido a que el tratamiento preliminar no trabaja correctamente reteniendo restos de objetos ya mencionados.

3.5.11. Técnicas de análisis de laboratorio

La evaluación físico o químico de las variables de operación del desarenador y hidrociclón se ha realizado en el laboratorio de Transferencia de Masa de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la UNSCH y en el laboratorio de análisis fisicoquímica de la PTAR “La Totorá”.

Los métodos, técnicas y protocolos que se van describir a continuación tienen respaldo en las operaciones desarrollados de control de calidad de SEDA AYACUCHO.

➤ Gravedad específica

La gravedad específica se ha determinado de acuerdo a la tabla 9.

Tabla 9

Determinación de la gravedad específica

Gravedad específica	
Norma	ASTM D854 -58
Método	Experimental
Materiales	Fiola de 500 mL, vaso precipitado, termómetro, balanza digital, embudo.

Fuente: (Matta, 2014).

Para ello se emplea la siguiente técnica

- Se ha pesado 100 g de muestra de malla #50 (secado al horno durante 12 horas mínimas o peso constante a 110 °C más menos 5 °C; una vez seca se ha dejado enfriar para ser pesado.
- Se ha pesado la fiola de 500 mL limpio y seco.

- Se ha pesado la fiola de 500 mL contenido de agua (W_o), de preferencia se ha quitado el oxígeno (burbujas) del agua con la ayuda de una cocina eléctrica llevándola a calentar para tener datos más exactos. Se ha añadido la muestra a la fiola de 500 mL contenido de agua, pero antes se ha separado cierta cantidad de agua en un vaso precipitado para luego completar hasta el aforo de la fiola.
- Se ha pesado la fiola con la mezcla completa (W_f).
- Luego se ha calculado el peso específico con la ecuación (11) con los pesos indicados anteriormente.

Peso específico

$$Y_s = \frac{W_s}{\frac{W_o + W_s - W_f}{Y_w}} \quad \dots (11)$$

Donde:

W_s : Peso de la muestra (sólido)

W_o : Peso de la fiola de 500 mL con contenido de agua

W_f : Peso de la fiola con la mezcla completa

Y_w : Peso específico del agua (1 g/cm^3) a 4°C

Una vez calculado el peso específico reemplazar en la Ecuación (12), para obtener la gravedad específica de la arena.

Gravedad específica

$$G_s = \frac{Y_s}{Y_w} \quad \dots (12)$$

Donde:

Y_w : Peso específico del agua (1 g/cm^3) a 4°C

Y_s : Peso específico del sólido

➤ **Materia orgánica**

La materia orgánica en las arenas se ha determinado de acuerdo a la tabla 10.

Tabla 10

Determinación de la materia orgánica

Materia orgánica

Método	Gravimétrico
Reactivos	Solución ácido clorhídrico 35%. 25 mL (1:1), agua destilada.
Materiales	Fíola, vaso precipitado, embudo, papel filtro, etc.

Fuente: (SEDALORETO, 2015)

Para ello se emplea la siguiente técnica

- Se ha pesado la muestra 10 g.
- Se ha preparado la solución con 12,5 mL de ácido clorhídrico concentrado al 35% con 12,5 mL de agua destilada para obtener 25 mL de solución HCl (1:1).
- 10 g de muestra fue atacada con 25 mL de solución HCl (1:1) según la indicación de la norma utilizada para arenas residuales, utilizada por la EPS SEDALORETO. Sera proporcional para diferentes cantidades de muestra y mucho mejor si es mayor a la cantidad de 10 g.
- Se ha realizado el ataque a la muestra con la solución HCl preparada y con ayuda de agua destilada para el enjuague de dicha muestra hasta que el líquido (residuo) se aprecie un color incoloro éste indica que ya no queda materia orgánica, ojo el HCl atacará toda la materia orgánica dejando solo la arena limpia.
- La arena limpia de materia orgánica se ha secado y pesado. Y luego se ha determinado por diferencia de peso la cantidad de materia orgánica eliminada.

➤ **Granulometría**

A la muestra (arena) del desarenador se ha hecho un previo lavado con HCl (1:1) con agua debido a que la arena está contaminada con materia orgánica.

La granulometría de las arenas se ha determinado de acuerdo a la tabla 11.

Tabla 11*Determinación granulométrica***Granulometría**

Norma	ASTM C 33
Reactivos	Solución ácido clorhídrico 35%. 25 mL (1:1), agua destilada.
Materiales	Balanza digital, tamices malla: 4, 8, 16, 30, 50, 50, 100, 200.

Fuente: (Oloya, 2015).

Para ello se emplea la siguiente técnica.

- Se ha secado la muestra por 24 horas a una temperatura constante de 110 más menos 5°C.
- Se ha pesado la cantidad necesaria de muestra ya retirada del horno.
- Se ha acoplado los tamices en forma manual o mediante algún aparato mecánico (sacudidor de malla) por un periodo suficiente, hasta que no más del 1% en peso del retenido en el tamiz pase por este en 5 minuto de cribado manual continuo.

➤ **Acumulación de arenas en el desarenador**

Para determinar la concentración de arenas en el fluido antes y después del desarenador se ha determinado por dos métodos, el método sedimentable de conos Imhoff y por el método gravimétrico sólido total y volátil.

a) Método sedimentable de conos Imhoff

La acumulación de los todos los sólidos en el desarenador se ha determinado de acuerdo a la tabla 12.

Tabla 12*Determinación de los sólidos sedimentables***Arenas acumulados**

Método	Sedimentación
Materiales	Probeta de 1000 mL, cono Imhoof de 1 L, soporte para conos Imhoof, reloj, agitador de vidrio.

Fuente: (Argandoña & Macias, 2013).

Para ello se emplea la siguiente técnica:

- La muestra a la entrada al desarenador fue extraída de diferentes alturas empezando con 0,20 m, 0,50 m y 0,80 m.
- La muestra a la salida del desarenador fue extraída de diferentes alturas empezando con 0,20 m, 0,30 m y 0,50 m.
- Las seis muestras se separan en probetas de 1000 mL, para luego pasarlo con mucha agitación a los seis conos Imhoof.
- Se ha dejado sedimentar 45 min, se ha colocado la muestra bien mezclada a los seis conos Imhoof hasta la marca de 1L. Una vez transcurrido este tiempo agitar suavemente los lados del cono con un agitador, se ha mantenido en reposo 15 min más y se ha registrado el volumen de sólidos sedimentables del cono como mL/L. Finalizando con las cantidades leídas de las tres muestras en el ingreso y tres a la salida del desarenador, se ha determinado un promedio de las tres muestras de ingreso y salida.

b) Método gravimétrico de sólidos totales y arena pura

La acumulación de sólidos y arena pura en el desarenador se ha determinado de acuerdo a la tabla 13.

Tabla 13

Determinación de sólidos y arenas pura

Sólidos y arenas acumulados

Método	Gravimétrico
Equipo	Estufa de secado (103 – 105 °C), mufla (550 °C)
Materiales	Balanza analítica, pinza, desecador, probeta 50 mL, capsulas de porcelanas

Fuente: (Argandoña & Macias, 2013).

- **Determinación de sólidos totales a 103 – 105 °C**

Preparación de las capsulas

Se ha tomado las cápsulas de porcelana, se lavaron con agua destilada para retirar residuos de polvo o cualquier impureza existente en las cápsulas, se han rotulado cápsulas como A1, A2 y A3, correspondiente al afluente y posteriormente los tres restantes como E1, E2 y E3, correspondiente al efluente, se han secado en la estufa a 110 °C durante 2 horas, se pasaron al desecador durante 15 min para su enfriado, pesado y reportado el peso de cada cápsula.

Muestra afluyente

Técnica.

- Se ha agitado la muestra invirtiendo el recipiente varias veces.
- De la muestra agitada, se ha medido 50 mL de la muestra del agua residual.
- Se ha agregado a cada capsula de porcelana A1, A2, A3, los 50 mL de muestra, se ha introducido en la estufa a 103 – 105 °C, durante 4 horas hasta que se evaporo toda el agua.
- Transcurrido ese tiempo, se pasaron las cápsulas al desecador alrededor de un tiempo máximo de 15 minutos, para asegurar que estas estén frías.
- Se pesaron las cápsulas una a una con los residuos sólidos siendo como (B1, B2 y B3), luego se han reportado los datos obtenidos.

Para calcular los sólidos totales del afluyente en mg/L en la muestra se ha utilizado la ecuación (13).

$$ST \text{ (mg/L)} = \frac{(B - A) \times 1000}{v} \quad \dots (13)$$

Donde:

ST : Sólidos totales (mg/L)

A : Peso de la capsula de evaporación (g)

B : Peso de la capsula de evaporación + residuo tras evaporación (g)

v : : Volumen de la muestra (L)

Muestra efluente

Técnica.

- Se han sacado del desecador las cápsulas vacías (**E1, E2 y E3**), cogiéndolas con una pinza metálica, no habiendo tocado con las manos debido a que las cápsulas ganaran humedad e intervendrá al momento del pesado.
- Se ha agitado la muestra invirtiendo el recipiente varias veces.
- De la muestra agitada, se ha medido con una probeta 50 mL de muestra luego se ha agregado a cada cápsula de porcelana, se ha introducido en la estufa a 103-105 °C, durante 4 horas o hasta que se evaporo toda el agua.
- Transcurrido ese tiempo, se pasaron las cápsulas al desecador alrededor de un tiempo máximo de 15 min, para asegurar que estas estén frías.

- Se han pesado las cápsulas una a una con los residuos sólidos siendo éstas (**F1, F2 y F3**), se han reportado los datos obtenidos.

Para calcular los sólidos totales del efluente en mg/L en la muestra se ha utilizado la ecuación (14).

$$ST \text{ (mg/L)} = \frac{(F - E) \times 1000}{v} \quad \dots (14)$$

Donde:

ST : Sólidos totales (mg/L)

E : Peso de la capsula de evaporación (g)

F : Peso de la capsula de evaporación + residuo tras evaporación (g)

v : Volumen de la muestra (L)

- **Determinación de arena pura a combustión a 550 °C**

Muestra del afluente

Técnica.

- Una vez pesada y registrado el valor de las cápsulas de la determinación de sólidos totales del afluente (peso de la cápsula tras evaporación + residuo de evaporación 105 °C), se han sometido a combustión en la mufla a 550 °C durante 20 min.
- Transcurrido ese tiempo, se han pasado las cápsulas al desecador alrededor de un tiempo máximo de 15 minutos, para asegurar que estas estén frías.
- Se han pesado las cápsulas una a una con los residuos sólidos volátiles siendo éstas (**C1, C2 y C3**), se han reportado los datos obtenidos.

Para calcular la arena pura sin materia orgánica del afluente en mg/L en la muestra se utiliza la ecuación (15).

$$AP \text{ (mg/L)} = \frac{(B - C) \times 1000}{v} \quad \dots (15)$$

Donde:

AP : Arena pura (mg/L)

B : Peso de la capsula de evaporación + residuo tras evaporación 105 °C (g)

- C : Peso de la capsula de evaporación + residuo tras combustión a 550 °C (g)
 v : Volumen de la muestra (L)

Muestra del efluente

Técnica.

- Una vez pesada y registrado el valor de las cápsulas de la determinación de sólidos totales del efluente (peso de la cápsula tras evaporación + residuo de evaporación 105 °C), se han sometido a combustión en la mufla a 550 °C durante 20 min.
- Transcurrido ese tiempo, se han pasado las cápsulas al desecador alrededor de un tiempo máximo de 15 minutos, para asegurar que estas estén frías.
- Se han pesado las cápsulas una a una con los residuos sólidos volátiles siendo éstos (**D1, D2 y D3**), se han reportado los datos obtenidos.

Para calcular la arena pura sin materia orgánica del efluente en mg/L en la muestra se ha utilizado la ecuación (16).

$$AP \text{ (mg/L)} = \frac{(F - D) \times 1000}{v} \quad \dots (16)$$

Donde:

- AP : Arena pura (mg/L)
 F : Peso de la capsula de evaporación + residuo tras evaporación a 105 °C (g)
 D : Peso de la capsula de evaporación + residuo tras combustión a 550 °C (g)
 v : Volumen de la muestra (L)

Las muestras se han tomado como se puede apreciar en la figura 19.

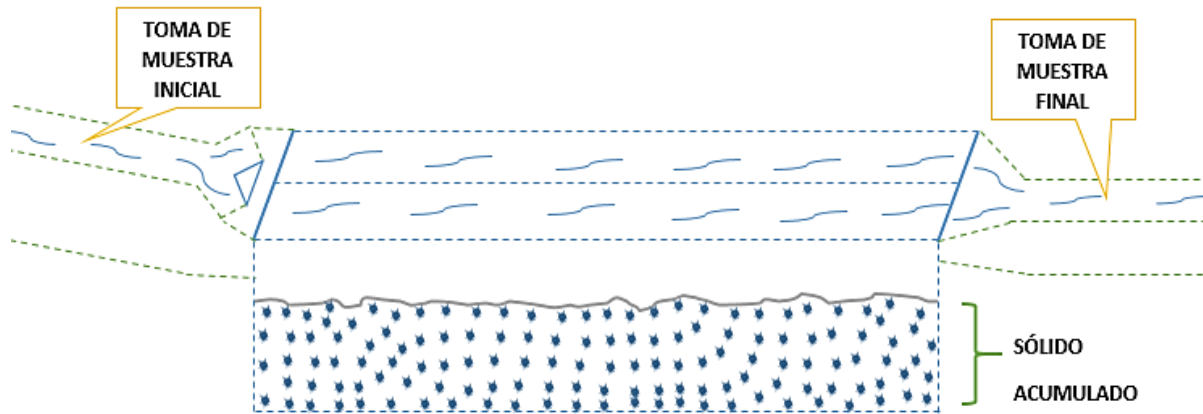


Figura 19. Toma de muestras

3.5.12. Resultados de los parámetros de evaluación

En este trabajo de investigación se ha utilizado el software más básico que es el Excel para resultados de los parámetros de evaluación. Finalmente, la interpretación de resultados es a través de representaciones gráficas del programa Excel.

3.5.13. Análisis y discusión de resultados

Se muestra a detalle en el capítulo VI. Para los parámetros evaluados de la unidad de desarenador y los parámetros evaluados del hidrociclón.

Los resultados de la evaluación del desarenador fueron comparados con la información literaria como la (Norma O.S.090), mientras los resultados del hidrociclón han sido comparados con la con trabajos de tesis, libros.

4.

CAPÍTULO IV: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

En este capítulo se hace mención al diseño y construcción del equipo, los criterios de diseño y los dimensionamientos del hidrociclón y su colector de arena.

4.1. CRITERIOS DE DISEÑO DEL HIDROCICLÓN

La remoción de arenas con hidrociclón es conveniente para la separación de fangos y arenas muy concentradas de una amplia gama de diversos tipos de industrias, por ejemplo, más usada en la industria minera y también una buena alternativa para las arenas residuales en las plantas de tratamiento de aguas residuales. Siendo el diseño y la construcción específicas del hidrociclón.

4.2. CAUDAL DE DISEÑO PARA EL HIDROCICLÓN

El hidrociclón se ha diseñado para una capacidad de 8 L/s, se ha elegido este caudal de acuerdo al dimensionamiento del equipo y también en función a eso se ha adquirido la capacidad de la electrobomba, con la finalidad de separar los sólidos del fluido que se encuentra en el desarenador, donde las temperaturas fluctúan a temperaturas de 19°C – 25°C, con colector incluido debajo del hidrociclón con capacidad de 30 kg de acumulación de los sólidos, también diseñada de acuerdo al dimensionamiento y tiempo de operación del equipo. Con la finalidad de evaluar los variables de operación empezando con un caudal de 6 L/s hasta 9 L/s, para cada caudal de alimentación el tiempo de funcionamiento fue de una hora.

4.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN HIDROCICLÓN

4.3.1. Forma del hidrociclón

El hidrociclón tiene forma cilíndrica y cónica, el material utilizado se ha elegido en criterio a la disponibilidad del material en el mercado local y con el fluido a trabajar de esta manera se ha elegido planchas de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor y tubería PVC de 2" para la alimentación desde el desarenador hasta el hidrociclón.

4.3.2. Diseño del hidrociclón

El diseño del hidrociclón se ha realizado en función al método descrito al cálculo basado en el criterio de velocidad de flujo y el caudal.

La literatura presenta el rango de parámetros de diseño, el cual se presenta en la tabla 14.

Tabla 14

Parámetros de diseño de hidrociclones de entrada tangencial

PARÁMETROS	VALOR
Diámetro del hidrociclón	< 1,0 m
Velocidad de alimentación	3,7 – 6,1 m/s
Presión de alimentación	50 – 100 psi

Fuente:(Barrera, Urrutia & Tolvet,2010).

Para la determinación del área de flujo de ingreso al hidrociclón se ha tomado en cuenta el rango de velocidad de entrada presentado en la tabla 14 que esta desde 3,7 – 6,1 m/s, tomando como velocidad de ingreso 4,1 m/s de acuerdo al diámetro de la tubería que existe en el mercado local, ya que si se tomaría un tubo de cédula 40 los diámetros no considerian a los cálculos encontrados, por el que más se ajusta es la tubería de 2 pulgadas OD. también cumpliendo con el rango de la velocidad indicada de ingreso al hidrociclón y tomando en cuenta el caudal escogido de acuerdo al dimensionamiento del equipo, con estos valores obtenidos se ha determinado el diámetro de la parte cilíndrica del hidrociclón, con ese valor de diámetro se ha calculado el resto de las configuraciones de la figura 20. El caudal y la velocidad determinada se muestra en la siguiente tabla 15, la capacidad del colector de arena fue 30 kg para un tiempo de operación de una hora, determinada en función a la concentración de ingreso al equipo y la presión de ingreso al hidrociclón de acuerdo a la literatura un rebose normal presenta una

presión de 4 psi. Los resultados de diseño se muestran en la tabla 15.

Tabla 15

Parámetros de diseño del hidrociclón

Velocidad de entrada	Presión ingreso	Caudal	Cantidad de arenas acumulada en el Colector	Tiempo de operación
(m/s)	(psi)	(L/s)	(kg)	(h)
4,1	4	8	30	1

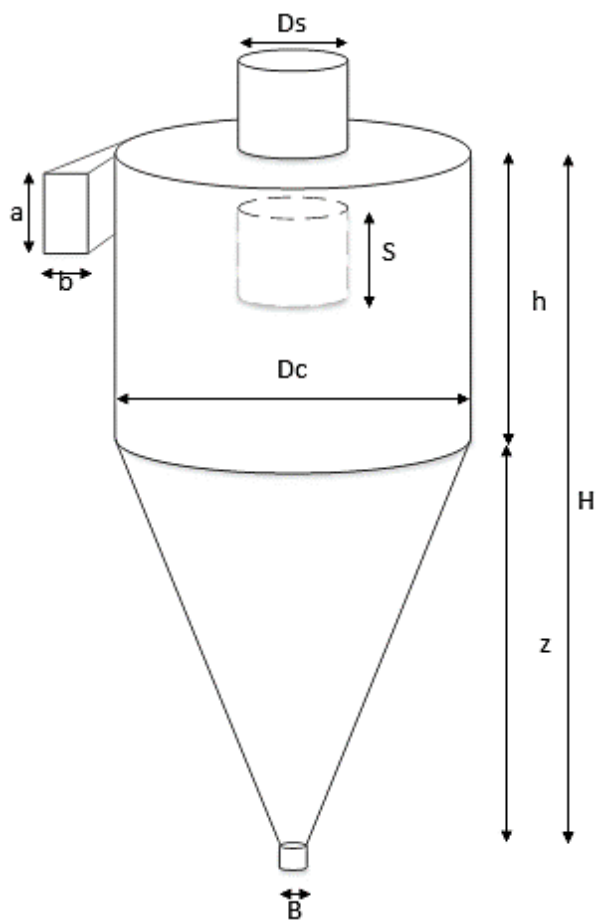


Figura 20. Configuración física del hidrociclón (Echeverri,2006)

Se ha elegido el hidrociclón de alta eficiencia STAIRMAND, debido a que el 51,24 % de arenas son de 0,071 mm de tamaño, porque estos hidrociclones son capaces de remover partículas más pequeñas con una buena eficiencia, las correlaciones se muestran en la tabla 16.

Tabla 16*Nomenclatura de los hidrociclones de alta eficiencia STAIRMAND*

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	NOMENCLATURA	STAIRMAND
Diámetro del hidrociclón	Dc	Dc/Dc	1,0
Altura de entrada	a	a/Dc	0,5
Ancho de entrada	b	b/Dc	0,2
Altura de salida	S	S/Dc	0,5
Diámetro de salida	Ds	Ds/Dc	0,5
Altura parte cilíndrica	h	h/Dc	1,5
Altura parte cónica	z	z/Dc	2,5
Altura total del hidrociclón	H	H/Dc	4,0
Diámetro salida de partículas	B	B/Dc	0,375

Fuente: (Echeverri, 2006).

El área se ha determinado una vez elegido como base de diseño el caudal y la elección de la velocidad de ingreso.

a) Área transversal del ingreso al hidrociclón

El área transversal se ha calculado una vez conocida la velocidad y caudal de ingreso, mediante la ecuación (17).

$$A_{in} = \frac{Q}{v_{in}} \quad \dots (17)$$

$$A_{in} = \frac{8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}}{4,1 \text{ m/s}}$$

$$A_{in} = 0,001951 \text{ m}^2$$

Para un hidrociclón tipo Stairmand se tiene las siguientes correlaciones:

La entrada rectangular a la parte cilíndrica se ha representado de la siguiente manera:

$$\text{Área del ducto de entrada} = a \times b \quad (*)$$

$$\text{Altura de entrada al hidrociclón } (a) = 0,5 \text{ Dc}$$

$$\text{Ancho de entrada al hidrociclón } (b) = 0,2 \text{ Dc}$$

Estos valores se aprecian en la tabla 16.

Igualando nuestras ecuaciones:

$$(*) \quad a \times b = 0,5 Dc \times 0,2 Dc = 0,001951 m^2$$

El material con el que se ha construido el hidrociclón fue planchas de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor.

b) Diámetro del hidrociclón

La ecuación (18) fue para calcular el diámetro del hidrociclón con los datos del área rectangular.

$$Dc = \sqrt{\frac{A_{in}}{0,5 \times 0,2}} \quad \dots (18)$$

$$Dc = \sqrt{\frac{0,001951 m^2}{0,5 \times 0,2}}$$

$$Dc = 0,1397 m = 14 cm$$

Una vez calculado el diámetro del hidrociclón se ha calculado el resto de las correlaciones como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17

Dimensiones del hidrociclón

Descripción	Símbolo	Medida calculada (cm)	(*) Medida asumida (cm)
Diámetro del hidrociclón	Dc	14,0	14,0
Altura de entrada	a	7,0	7,00
Ancho de entrada	b	2,8	3,00
Altura de salida	S	7,0	7,00
Diámetro de salida	Ds	7,0	7,62
Altura parte cilíndrica	h	21,0	21,0
Altura parte cónica	z	35,0	35,0
Altura total del hidrociclón	H	56,0	56,0
Diámetro salido de partículas	B	5,25	5,00
Ángulo de cono = 12° θ	Dc		

(*) La medida asumida se refiere a las medidas comerciales que se encuentran en el mercado local ya sea de tuberías y otros accesorios, que se ajustan al dimensionamiento de este equipo que se ha construido.

El ángulo de la sección cónica es 12° para hidrociclones < 10 pulg y hasta 20° para hidrociclones > 10 pulg. La presión mínima para obtener un Overflow normal es 4 psi para hidrociclones < 10 pulg y 7 psi para hidrociclones > 10 pulg, menciona Krebs Engineers. (Segura, 2009).

Una vez obtenida las medidas de las dimensiones del hidrociclón, se ha empezado con el diseño en dibujo 3D para ver cómo quedaría con estas medidas (tabla 17) de la misma manera para ver su mejor visualización como se puede apreciar en la figura 21. Para luego proceder con la construcción del equipo completo del hidrociclón.

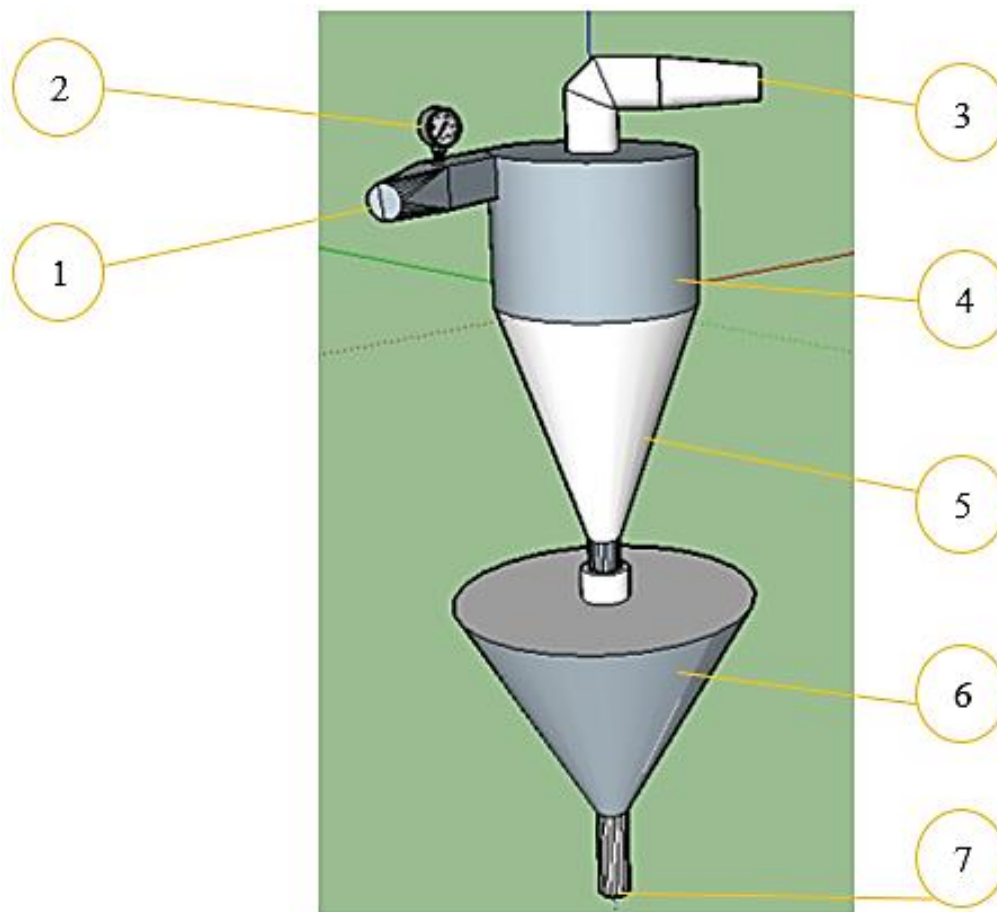


Figura 21. Diseño del hidrociclón ensamblado con el colector de arena

1. Entrada (Inlet) a la parte cilíndrica del hidrociclón
2. Manómetro instalado a la entrada del hidrociclón
3. Salida (Overflow) superior del hidrociclón
4. Parte cilíndrica del hidrociclón
5. Parte cónica del hidrociclón
6. Colector de arena del hidrociclón
7. Salida (Underflow) inferior del colector de arena

c) Número de Reynolds

Con el fin de conocer las condiciones de flujo al ingreso del hidrociclón si se encuentra en los parámetros establecidos de 10^4 - 10^6 , ahora lo comprobaremos mediante la ecuación (19).

Como se sabe el caudal es 8 L/s y el área de ingreso según las medidas definidas fue 0,0195120 m².

La velocidad de ingreso al hidrociclón es 4,1 m/s, la densidad del flujo de ingreso al hidrociclón se ha tomado como la densidad de agua debido a que se encuentra en mayor proporción con 99% de agua, entonces la densidad es 0,9721 g/mL a una temperatura de ingreso de 21,23°C.

$$\rho = 0,9721 \frac{g}{ml} = 972,1 \text{ kg/m}^3$$

La viscosidad del flujo de ingreso al hidrociclón también se ha considerado solo de agua con un valor de $9,7348 \times 10^{-4}$ kg/m.s a 21,23 °C.

El diámetro del hidrociclón $D_c = 14 \text{ cm} = 0,14 \text{ m}$.

Los valores calculados se han reemplazado en la ecuación (19).

$$Re = \frac{D_c \cdot v \cdot \rho}{\mu} \quad \dots (19)$$

Donde:

Re : Reynolds

v : Velocidad del flujo de ingreso al hidrociclón (m/s)

ρ : Densidad del flujo de ingreso al hidrociclón (kg/m^3)
 μ : Viscosidad del flujo de ingreso al hidrociclón (kg/m.s)

$$Re = \frac{0,14 \text{ m } (4,1 \text{ m/s}) 972,1 \text{ kg/m}^3}{9,7348 \times 10^{-4} \text{ kg/m.s}}$$

$$Re = 5,73 \times 10^5$$

El valor de Reynolds debe estar en el rango de $10^4 - 10^6$ cumpliéndose con este parámetro.

Luego se ha calculado el volumen de cada componente del equipo del hidrociclón.

d) Volumen de la parte cilíndrica del hidrociclón

Para calcular el volumen de la parte cilíndrica del hidrociclón se ha utilizado la ecuación (20).

$$V_{cilindro} = \frac{\pi \times Dt^2 \times Ht}{4} \quad \dots (20)$$

Donde:

Dt^2 : Diámetro del cilindro del hidrociclón (m)

Ht : Altura de la parte cilíndrica del hidrociclón (m)

$$V_{cilindro} = \frac{\pi (0,14 \text{ m})^2 (0,21 \text{ m})}{4} = 0,003233 \text{ m}^3 = 3,2330 \text{ L}$$

e) Volumen de la parte cónica (trunco) del hidrociclón

Para calcular el volumen de la parte cónica del hidrociclón se ha utilizado la ecuación (21)

$$V_{cono} = \frac{\pi \times Ht \times (R^2 + r^2 + R \times r)}{3} \quad \dots (21)$$

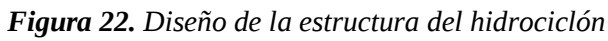
Donde:

Ht : Altura de la parte cónica del hidrociclón (m)

R : Radio mayor del cono trunco (m)

r : Radio menor del cono trunco (m)

$$V_{cono} = 0,002666m^3 = 2,666 L$$



Para calcular el volumen del colector se ha utilizado la misma ecuación (21)

$$V_{colector} = 0,0111 \text{ m}^3 = 11,1 \text{ L}$$

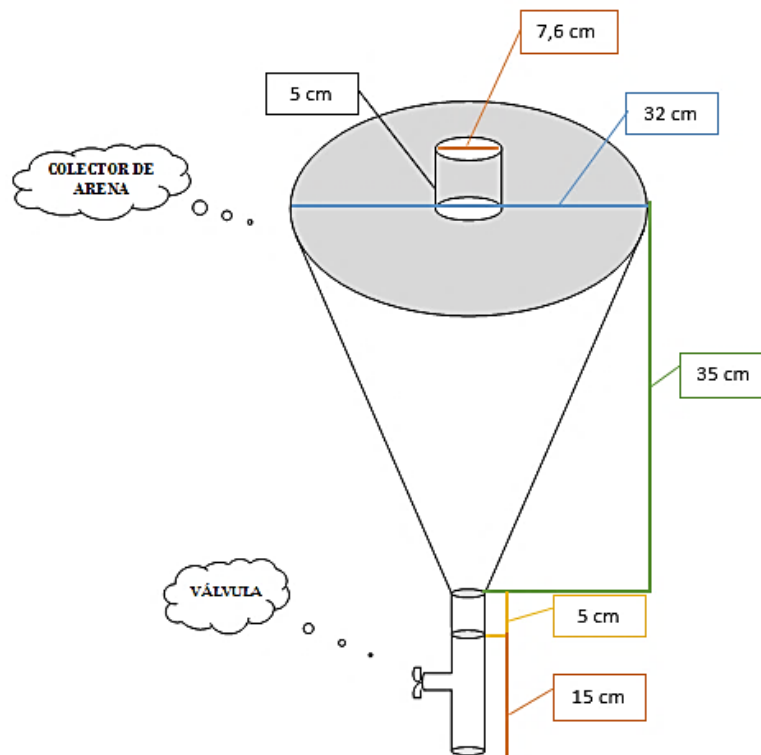


Figura 23. Diseño de la estructura del colector de arena

4.3.3. Cubicación, dimensionamiento de los componentes

Una vez diseñada el hidrociclón y obtenida las medidas calculadas como se observa en la tabla 17 se ha llegado a dar las medidas correspondientes a las planchas de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor.

➤ Para la parte cilíndrica del hidrociclón

Para calcular la longitud de corte de la plancha se ha utilizado la siguiente ecuación (22)

$$Lc = \pi \times \phi \quad \dots (22)$$

Donde:

Lc : Longitud de corte (cm)

π : pi (3,1416)

ϕ : Diámetro del hidrociclón (14 cm)

$$Lc = \pi (14) = 44 \text{ cm}$$

Una vez calculado la longitud de corte se procedió al corte de la plancha, pero se sabe que la

altura del cilindro es 21 cm como se puede apreciar en la figura 22, entonces el corte de la plancha fue:

$$\text{Corte de la plancha} = 44 \text{ cm} \times 21 \text{ cm}$$

➤ **Para la parte cónica del hidrociclón**

En el diseño para la parte cónica, el ángulo de la sección cónica es 12° para hidrociclones < 10 pulg menciona Krebs Engineers. Luego se ha hecho los cálculos correspondientes para determinar el ángulo grande, pequeño para juntar y formar el diámetro mayor y menor del cono, por lo tanto, ambos ángulos tienen que tener el mismo valor, obteniendo resultados de mismos valores tanto para diámetro mayor y menor, se ha determinado utilizando los datos de la figura 24.

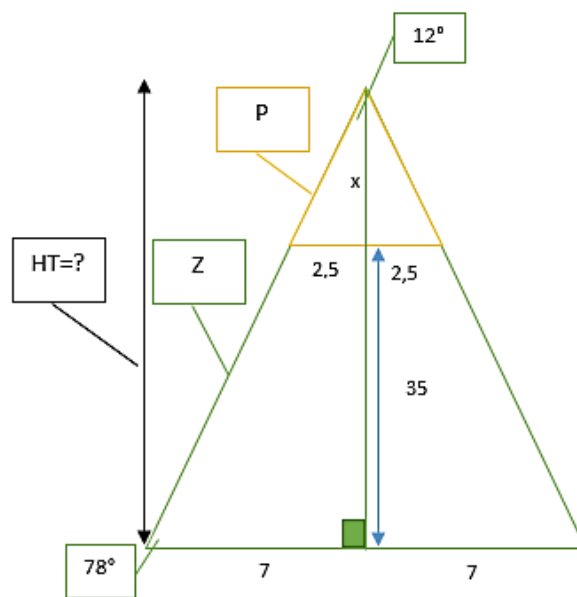


Figura 24. Representación de la parte cónica del hidrociclón

$$\frac{x + 35}{7} = \frac{x}{2,5}$$

$$x = 19,4444 \text{ cm}$$

$$HT = 54,4444 \text{ cm}$$

Calculando la hipotenusa, las unidades están representadas en cm.

$$Z = \sqrt{(54,4444)^2 + (7)^2} = 54,892555$$

$$P = \sqrt{(19,4444)^2 + (2,5)^2} = 19,604455$$

$$Lg = \Pi \times \phi_g = \Pi(14) = 43,982297$$

$$Lp = \Pi \times \phi_p = \Pi(5) = 15,707963$$

Donde:

Lg : Longitud grande

Lp : Longitud pequeño

Ángulo mayor

$$\alpha_g = \frac{Lg \times 180^\circ}{Z \times \Pi} = 45,9079^\circ$$

Ángulo menor

$$\alpha_p = \frac{Lp \times 180^\circ}{p \times \Pi} = 45,9079^\circ$$

Una vez calculadas las medidas y los ángulos pasaron por el respectivo corte.

Ahora para el colector de arena se ha aplicado los mismos pasos anteriores, pero con los datos de la figura 25.

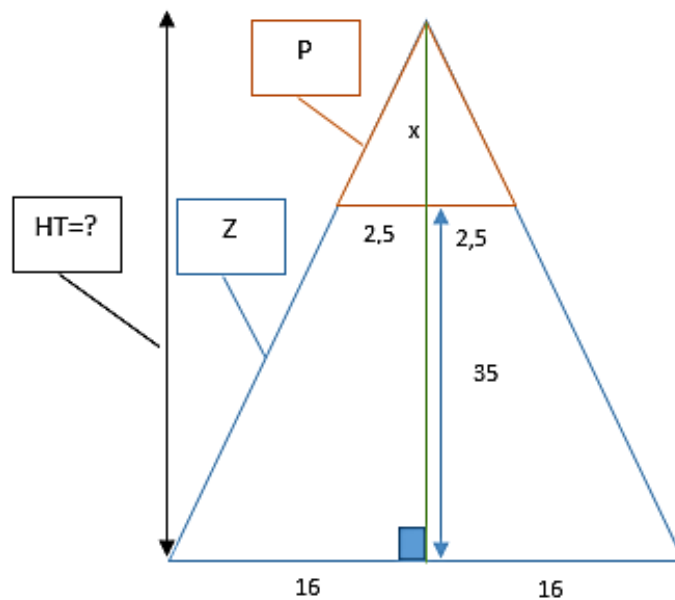


Figura 25. Representación del colector de arena

4.3.4. Cortes, rolado de las planchas

Una vez ya dada las medidas en las planchas se hace el corte para luego pasar al rolado para dar forma al cilindro, conos, de la tapa (salida superior), de la entrada tangencial, del colector (salida inferior). Pero antes de aplicar en las planchas metálicas de hierro galvanizado, se ha realizado plantillas en cartulina para poder ver el reflejo en el metal. Como se puede apreciar en la figura 26.

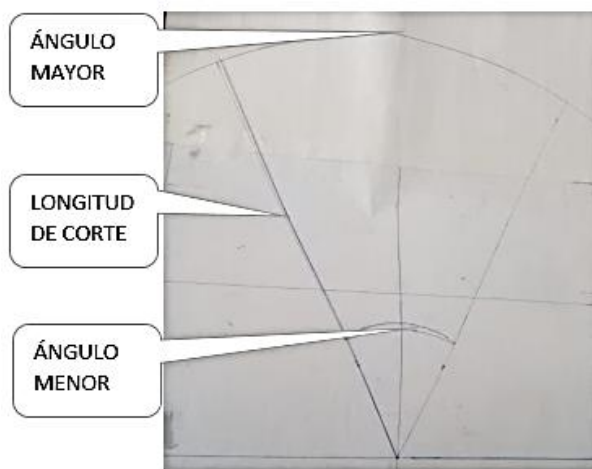


Figura 26. Representación en plantillas del cono del hidrociclón

La figura 27 muestra la forma del cono en plantilla de cartulina, esto se ha realizado con el fin de ver que cómo quedaría plasmado en hierro galvanizado



Figura 27. Forma del cono del hidrociclón en plantilla

Se dio importancia a la entrada tangencial al hidrociclón porque dar forma a ésta es más trabajosa que el resto de los componentes, consiste en convertir la entrada redondo del tubo en rectangular como se puede ver en la figura 28. De igual manera primero se ha plasmado en papel de cartulina para ver cómo quedaría plasmado en el metal.

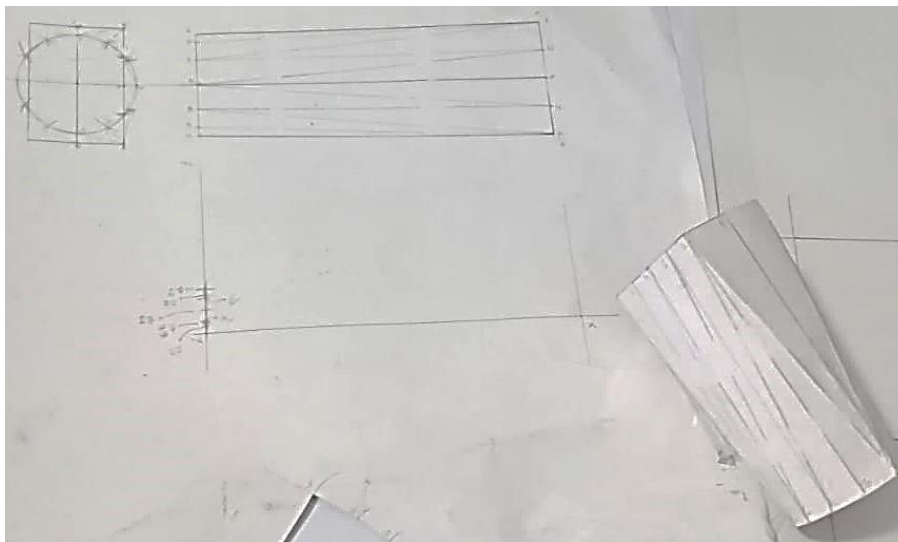


Figura 28. Componente de entrada tangencial del hidrociclón representada en plantilla

Una vez vista los buenos resultados en la formación de los componentes en plantillas en cartulina se ha procedido con la construcción en metal.

a) Construcción del hidrociclón y su colector

Para la construcción del hidrociclón, previamente se ha seleccionado el tipo y la geometría del material con la que se ha trabajado, de acuerdo a la disponibilidad y costo de dicho material en el mercado local. De modo que se ha construido con plancha de hierro galvanizado de 1,20 mm de espesor con 14 centímetros de diámetro la parte cilíndrica del hidrociclón, con una altura cilíndrica de 21 cm y con una altura de la parte cónica de 35 cm.

Se ha colocado un colector de material hierro galvanizado 1,20 mm de espesor como acumulador de arena tiene forma cónica para una descarga continua con una salida de 2 pulgadas de diámetro sujeta a una válvula, con una capacidad de 30 kg. Como se aprecia en la figura 29.



Figura 29. Construcción del hidrociclón

b) Construcción del módulo para el hidrociclón y su colector

El módulo de soporte del hidrociclón, también se ha construido en el taller electromecánico “Holger K. Hansen” de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. El material empleado fue hierro de 1 pulgada, con una altura de 1,60 metros para sostener el hidrociclón y su colector de arena. Esta sostenida de 3 piezas de hierros como soporte dando una forma triangular con 40 centímetros de lado a lado. Como se puede ver en la figura 30.



Figura 30. Construcción del módulo para el soporte del hidrociclón

c) Construcción del soporte para la electrobomba sumergible

Para el módulo de soporte para la electrobomba, el material empleado también fue hierro galvanizado tubo cuadrado de 1 pulgada de diámetro. 20 cm² fue la base para que la bomba sea sujeta y fija, cuatro fierros de 3/8 de pulgadas de diámetro para ser sujeta desde la base de la plataforma construida para ser aseguradas a la superficie del desarenador de ambos lados frente a frente para su mejor estabilidad, también se ha colocado 4 fierros 5/8 de pulgadas de 60 cm de largo para ser sujeta desde la superficie irregular de los sólidos acumulados, todo se ha realizado para su mejor funcionamiento ya con este soporte fue sumergida a 40 cm del nivel del agua residual para su succionamiento correcto.

La construcción del módulo se ha realizado como se puede observar en la figura 31.



Figura 31. Construcción del módulo para el soporte de la electrobomba

4.3.5. Ensamblado de los componentes del hidrociclón

Los componentes una vez unidas al hidrociclón fueron pasados al ensamblado de todo el equipo, dando finalizado la construcción del equipo completo. Como se puede ver en la figura 32.



Figura 32. Ensamblado de los componentes del hidrociclón

4.3.6. Pruebas hidráulicas “sin carga”

Las pruebas se hicieron con fines de encontrar fugas en los componentes del equipo ya sea en el momento de la soldadura o en el acabado de los componentes, habiéndose encontrado sin fuga al momento de la prueba.

4.3.7. Pruebas hidráulicas “con carga”

En esta última parte se ha realizado las pruebas con muestras de agua con arena en suspensión para ver sus primeros detalles e imprevistos durante el funcionamiento del hidrociclón, la muestra se ha preparado en un bidón de 100 L, donde se ha sumergido la electrobomba y se ha realizado las instalaciones correctas para su funcionamiento, dando sus resultados con problemas de ajustes en la succión de la electrobomba y mejorando todos los detalles encontrados que posteriormente se ha encontrado pocos problemas durante la instalación y evaluación en la PTAR “La Totorá”.

Las pruebas se hicieron fuera del laboratorio de transferencia de masa, como se puede ver en la figura 33.



Figura 33. Prueba hidráulica con carga

CAPÍTULO V: RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presentan los resultados de la evaluación de los parámetros de operación del canal del desarenador y los resultados obtenidos de la evaluación del hidrociclón en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá”.

5.1. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE LAS ARENAS RESIDUALES

La investigación ha empezado con la determinación de la granulometría de estas arenas para tener información de los diámetros de mayor a menor tamaño que llegan a acumularse en el desarenador, seguido con la caracterización física y química de las arenas residuales. Las pruebas fueron realizadas en los laboratorios de cerámica y transferencia de masa de la Facultad de Ingeniería Química.

5.1.1. Granulometría de las arenas residuales

Para determinar la granulometría de las arenas se ha realizado previo lavado con solución de HCl (1:1) para eliminar las materias orgánicas presentes en las arenas.

La granulometría se ha determinado a través de tamices de mallas enumeradas en la tabla 18, La determinación se ha realizado en el laboratorio de cerámica de la Facultad de Ingeniería Química y Metalurgia como se puede ver en la figura 34.



Figura 34. Determinación de tamaños de arenas

Tabla 18

Determinación granulométrica a través del tamiz

N° Malla	Abertura (mm)	Peso retenido (g)	% Retenido (%)	% Acumulado Retenido (%)	% Acumulado Pasante (%)
# 4	5,000	0,0000	0,0000	0,0000	100,000
# 8	2,500	0,0000	0,0000	0,0000	100,000
# 16	1,000	0,0600	0,0349	0,0349	99,9651
# 30	0,630	0,9900	0,5752	0,6101	99,3899
# 50	0,315	12,900	7,4956	8,1058	91,8942
# 100	0,160	61,400	35,6769	43,7827	56,2173
# 200	0,071	88,650	51,5107	95,2934	4,70660
FONDO		8,1000	4,7066	100,000	0,0000
	Σ	172,10			

La masa tomada como muestra fue 173 g de arena limpia de materia orgánica, previamente lavado con HCl.

Masa total una vez pasada por las mallas es 172,10 g. La diferencia es 0,9 g que se perdió durante el proceso de granulometría.

5.1.2. Caracterización física de las arenas residuales

Las arenas residuales retiradas de la unidad de desarenador tienen un aspecto oscuro, la determinación de sus características se hicieron a través de pruebas preliminares, que fueron realizadas en el laboratorio de transferencia masa de la facultad de ingeniería química y metalurgia.

a) Gravedad específica de arenas residuales

La gravedad específica de las arenas residuales se puede decir que es igual a la densidad de la arena entre la densidad del agua. Se tiene por conocimiento que la densidad del agua es 1 g/ml a 4°C por lo tanto la densidad de la arena es igual a la gravedad específica. Es por lo tanto que la Gravedad específica es una cantidad sin dimensiones. (tabla 19).

Para determinar la gravedad específica se ha realizado tres repeticiones para obtener un promedio representativo para fines cálculos posteriores, se ha seguido la técnica detallada en el capítulo III.



Figura 35. Determinación de la gravedad específica

Tabla 19*Determinación de la gravedad específica de las arenas residuales*

Ensayo	Masa de la muestra (g)	Masa de fiola + agua (g)	Masa de fiola + agua + arena (g)	Gravedad específica
1	100,2	666,2	728,1200	2,6176
2	102,0	666,8	729,9200	2,6235
3	101,5	666,7	729,4800	2,6214
			Promedio	2,6208

b) Densidad aparente de arenas residuales

La arena pesada en una balanza analítica y el volumen que se ha medido en una probeta de 10 mL son los datos. Para determinar la densidad aparente, se ha realizado tres repeticiones para obtener un promedio representativo, los resultados se muestran en la tabla 20.

Tabla 20*Determinación de la densidad aparente de las arenas residuales*

Ensayo	Masa (g)	Volumen (mL)	Densidad aparente (g/mL)
1	8,1	6,9	1,1739
2	8,3	7,0	1,1857
3	8,1	6,8	1,1912
		Promedio	1,1836

c) Determinación de humedad de las arenas residuales

Para determinar la humedad de las arenas retiradas de la unidad de desarenador, las muestras se han sometido al equipo de determinador de humedad con las siguientes condiciones: temperatura 92°C, peso de muestra establecido por el equipo es entre 3 – 5 g. Las cantidades pesadas se encuentran en la tabla 21. Se ha realizado dos repeticiones para obtener un promedio, en la tabla 21 se observa con más detalle.

Tabla 21
Determinación de la humedad de las arenas residuales

Muestra	Masa (g)	Temperatura (°C)	Humedad (%)
1	4,5350	92	82,85
2	4,6484	92	82,89
		Promedio	82,87

5.1.3. Caracterización química

La caracterización química especialmente el contenido de materia orgánica presente en las arenas se ha determinado mediante un ataque químico.

a) Determinación de materia orgánica por ataque químico

Para poder determinar la materia orgánica presente en las arenas se ha aplicado el experimento por ataque químico a la muestra, que consiste en lavar la arena con una solución de HCl (1:1) con agua destilada como indica en el ítem de técnicas de análisis, como se puede apreciar en la figura 36. En la tabla 22 se muestra los resultados.

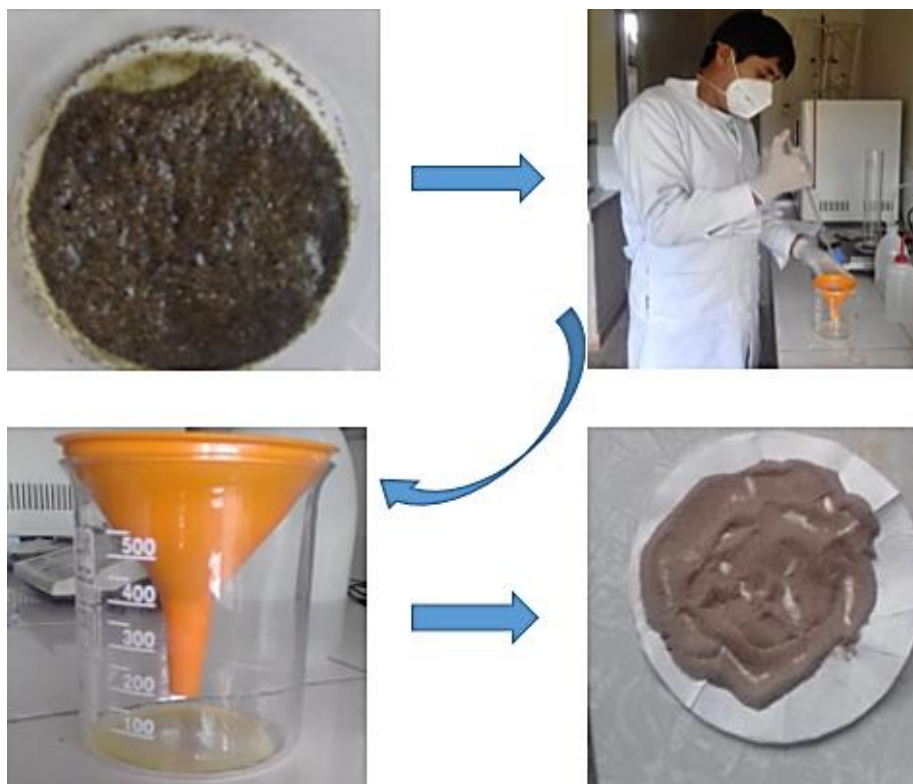


Figura 36. Determinación de la materia orgánica en las arenas

Tabla 22*Determinación de materia orgánica presente en arenas residuales*

Tamaño	Masa de la arena	Masa de arena	Masa de M.O	% M.O
contenido de M.O		limpia		
(mm)	(g)	(g)	(g)	(%)
0,315	10,0	8,93	1,07	10,7
0,315	10,0	8,96	1,04	10,4
0,315	10,0	8,90	1,10	11,0
			Promedio	10,7

5.2. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL CANAL DEL DESARENADOR ACTUAL

Los parámetros de operación del canal del desarenador evaluados, se detalla a continuación:

5.2.1. Velocidad longitudinal en el canal de desarenador

La velocidad longitudinal se ha realizado con dos técnicas:

a) Determinación de la velocidad longitudinal con técnica de sin aforo

La primera se ha aplicado la técnica de sin aforo que consiste en marcar punto de partida y punto de llegada en el mismo desarenador para luego ser arrastrado la esfera utilizada, por el flujo del agua controlando el tiempo desde la partida hasta la salida.

Para realizar esta técnica se ha necesitado el apoyo de dos personas.

- Se ha marcado y ubicado el punto de partida y llegada en el desarenador a una medida determinada.
- Se ha colocado la esfera antes del punto de partida y teniendo en cuenta que la esfera debe recorrer por el medio del flujo del agua residual del desarenador.
- Se ha controlado el tiempo de partida y llegada del recorrido de la pequeña esfera de polietileno y tecnopor de la distancia indicada.
- Se ha calculado la velocidad promedio del desarenador una vez obtenida la distancia y tiempo, primero se ha calculado la velocidad máxima.

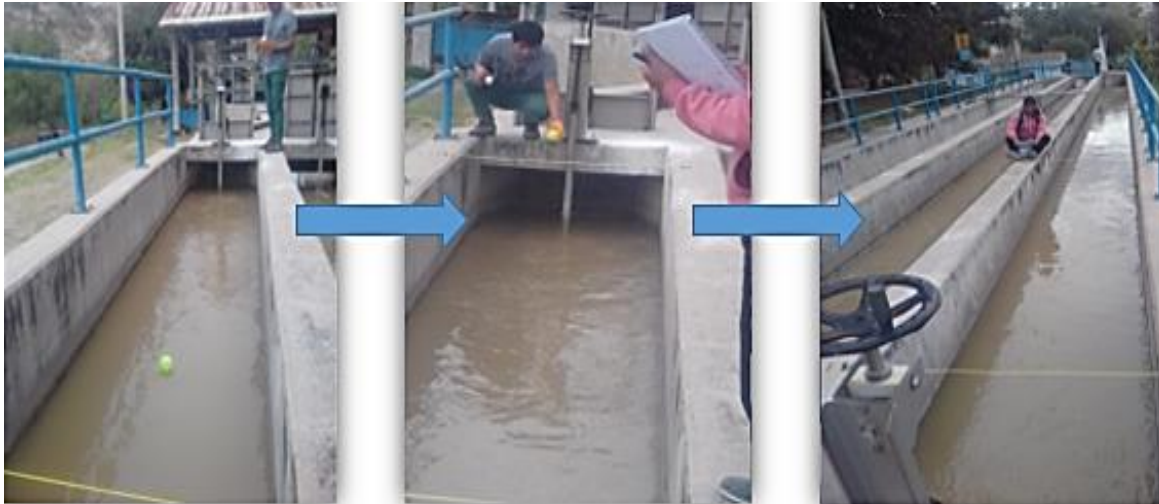


Figura 37. Determinación de la velocidad longitudinal con la técnica de sin aforo.

La determinación de la velocidad longitudinal en el desarenador se ha realizado con dos esferas pequeñas de 2 pulgadas de diámetro de material tecnopor y una esfera de 2 pulgadas de diámetro de material polietileno. De las cuales se ha tomado el promedio final del material de polietileno por la poca presencia de error que presenta. La velocidad promedio se ha calculado con la ayuda de la ecuación (23).

$$\text{Velocidad promedio} = (0,8) \cdot \text{Velocidad máxima} \quad \dots (23)$$

Tabla 23

Determinación de la velocidad con esfera de polietileno

Ensayo	Tiempo (s)	Distancia (m)	Veloc. (máx) (m/s)	Veloc. (promedio) (m/s)
1	14,77	5,0	0,3385	0,2708
2	14,36	5,0	0,3482	0,2786
3	14,43	5,0	0,3465	0,2772
4	14,63	5,0	0,3418	0,2734
5	14,34	5,0	0,3487	0,2789
		Promedio	0,3447	0,2758

Tabla 24*Determinación de la velocidad con esfera de tecnopor (1)*

Ensayo	Tiempo (s)	Distancia (m)	Veloc. (máx) (m/s)	Veloc. (promedio) (m/s)
1	14,55	5,0	0,3436	0,2749
2	14,58	5,0	0,3429	0,2743
3	14,07	5,0	0,3554	0,2843
4	14,06	5,0	0,3556	0,2845
5	14,52	5,0	0,3444	0,2755
		Promedio	0,3484	0,2787

Tabla 25*Determinación de la velocidad con esfera de tecnopor (2)*

Ensayo	Tiempo (s)	Distancia (m)	Veloc. (máx) (m/s)	Veloc. (promedio) (m/s)
1	14,36	5,0	0,3482	0,2786
2	14,61	5,0	0,3422	0,2738
3	14,99	5,0	0,3336	0,2668
4	14,59	5,0	0,3427	0,2742
5	15,12	5,0	0,3307	0,2646
		Promedio	0,3395	0,2716

b) Determinación de la velocidad longitudinal con área y caudal del desarenador.

La segunda se ha determinado con el área de flujo del desarenador, consiste en que se ha medido la altura del nivel del flujo de agua para luego calcular el área con el ancho de diseño del desarenador, una vez obtenido este dato y con el caudal del flujo se ha llegado a calcular la velocidad horizontal o longitudinal.

La evaluación se ha realizado en la temporada de lluvia (inter diario) solo en las mañanas a la misma hora para determinar la mayor velocidad durante el día, en la tabla 26 se muestra los resultados de la evaluación. Para obtener la velocidad longitudinal los datos se han remplazado en la ecuación (24).

$$v_{L,D} = \frac{Q_D(m^3/s)}{A_D(m^2)} \quad \dots (24)$$

Donde:

$v_{L.D}$: Velocidad longitudinal en el primer canal del desarenador

Q_D : Caudal del agua residual en el primer canal del desarenador

A_D : Área del flujo del agua residual en el primer canal del desarenador

Tabla 26

Determinación de la velocidad longitudinal con área y caudal

Ensayo	Área (m ²)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)
1	0,8760	0,2325	0,2654
2	0,8160	0,2270	0,2782
3	0,7910	0,2455	0,3104
4	0,8400	0,3250	0,3869
5	0,7560	0,3150	0,4167
6	0,7080	0,3071	0,4338

5.2.2. Velocidad de sedimentación de las arenas residuales

Se ha determinado con la ayuda de la granulometría de las arenas residuales, la velocidad de sedimentación se ha realizado de acuerdo al tamaño de las arenas presentes en el desarenador.

Para calcular la velocidad de sedimentación del menor tamaño se ha aplicado la ley de Stokes ecuación (25), debido a que los tamaños menores de 0,01 cm son de régimen laminar. (OPS/CEPIS, 2005).

LEY DE STOKES

$$V_s = \frac{1}{18} \times g \left(\frac{\rho_a - \rho}{\eta} \right) d^2 \quad \dots (25)$$

Donde:

V_s : Velocidad de sedimentación de las arenas (m/s)

g : Gravedad (981 cm/s²)

ρ_a : Gravedad específica de la arena (2,6208)

ρ : Densidad del agua a 20 °C (0,9982 g/cm³)

η : Viscosidad cinemática del agua a 20 °C (1,0105 x 10⁻² cm²/s)

d : Diámetro de la arena (cm)

Para calcular la velocidad de sedimentación de tamaños 0,015 a 0,1 cm se ha aplicado la ley de Allen ecuación (26), debido a que los tamaños en este rango son régimen transición. (OPS/CEPIS, 2005)

LEY DE ALLEN

$$V_s = 0,22 \left(\frac{\rho_a - \rho}{\eta} \right)^{\frac{2}{3}} \left[\frac{d}{\left(\frac{\eta}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}}} \right] \quad \dots (26)$$

Donde:

V_s : Velocidad de sedimentación de las arenas (m/s)

g : Gravedad (981 cm/s²)

ρ_a : Gravedad específica de la arena (2,6208)

ρ : Densidad del agua a 20 °C (0,9982 g/cm³)

η : Viscosidad cinemática del agua a 20 °C (1,0105 x 10⁻² cm²/s)

d : Diámetro de la arena (cm)

Los datos se utilizaron de tabla de densidad y viscosidad del Anexo 8.

Tabla 27

Determinación de la velocidad de sedimentación

Material	ϕ partícula (cm)	Vs (cm/s)	RE (m/s)	Vs (m/s)	Régimen
Arena fina	0,1	13,8555	137,1153	0,1386	Transición
Arena fina	0,063	8,7290	54,4211	0,0873	Transición
Arena fina	0,0315	4,3645	13,6053	0,0436	Transición
Arena fina	0,0160	2,2169	3,5102	0,0222	Transición
Arena muy fina	0,0071	0,4421	0,3100	0,0044	Laminar

5.2.3. Tiempo de retención de las arenas residuales

Es el tiempo que demora la arena en depositarse en el fondo del desarenador, para calcular este tiempo se ha aplicado la ecuación (27).

$$T_{h.D} = \frac{H(m)}{V_{S.D}} \quad \dots (27)$$

Donde:

$T_{h.D}$: Tiempo de retención de las arenas residuales en el desarenador

H : Altura del nivel del agua del desarenador

$V_{S.D}$: Velocidad de sedimentación de las arenas en el desarenador

Donde la altura promedio que se ha medido durante fin de mes es $H = 0,6$ m de nivel del flujo de agua residual, este valor es reemplazado para calcular el tiempo de retención de las arenas de todos los tamaños de arenas que existen en el desarenador. En la tabla 28 se muestra los resultados para cada tamaño.

Tabla 28
Determinación del tiempo de retención

Material	ϕ partícula (cm)	Vs (m/s)	T_{h. D} (s)
Arena fina	0,1	0,1386	4,3304
Arena fina	0,063	0,0873	6,8737
Arena fina	0,0315	0,0436	13,7473
Arena fina	0,0160	0,0222	27,0651
Arena muy fina	0,0071	0,0044	136,0075

5.2.4. Acumulación de arenas residuales en el desarenador

La cantidad de sólidos acumulados en el desarenador se ha determinado de dos maneras una con la ayuda de los conos Imhoff y la otra sometiendo la muestra en un horno a 105° C hasta volatilizar el agua de la muestra, quedando solo el sólido total y determinando así la concentración, se ha aplicado la misma técnica de la determinación de sólidos totales.

a) Determinación de la cantidad en volumen de sólidos en el desarenador.

Para poder determinar cantidad en volumen se ha realizado con la ayuda de los conos Imhoff, los resultados obtenidos se pueden apreciar en la tabla 29. Las muestras se tomaron en la entrada y salida del desarenador las muestras tomadas se pueden apreciar en la siguiente figura.



Figura 38. Determinación de sólidos sedimentables con conos Imhoff

Materia orgánica insoluble : (arroz, quinua, lentejas, etc)

Materia orgánica soluble : heces fecales.

Tabla 29

Cantidad de arena y otras partículas presentes en la muestra de 1L

Muestra	Arena (mL)	Arcilla (mL)	Materia orgánica insoluble. (mL)	Materia orgánica soluble. (mL)
ENTRADA AL DESARENADOR				
Muestra 1	5,5	2,0	2,5	1,4
Muestra 2	5,4	2,1	2,5	1,4
Muestra 3	5,6	2,0	2,5	1,6
SALIDA DEL DESARENADOR				
Muestra 1	< 0,1	< 0,1	3,0	2,0
Muestra 2	< 0,1	< 0,1	2,8	1,9
Muestra 3	< 0,1	< 0,1	3,1	2,2

Tabla 30

Promedio de cantidad de arena y otras partículas

Descripción	Entrada(mL)	salida(mL)
Arena	5,5	< 0,1
Arcilla	2,0	< 0,1
Materia orgánica insolubles	2,5	3,0
Materia orgánica soluble	1,5	3,5

b) Determinación de la cantidad en peso de sólidos en el desarenador.

Se ha determinado tomando la muestra en el ingreso al desarenador los resultados se aprecian en la tabla 31 y la muestra de salida del desarenador los resultados se aprecian en la tabla 32. Se ha llegado aplicar la técnica de sólidos totales como se aprecia en la siguiente figura 39, para eliminar el agua en la muestra de 50 mL se ha sometido en un horno a 105°C durante cuatro horas.



Figura 39. Determinación de sólidos totales

Tabla 31

Sólidos totales en la entrada al desarenador

Altura de muestreo	Masa de crisol	Masa de crisol + muestra	Masa de la muestra
(cm)	(g)	(g)	(g)
20	47,9872	48,0703	0,0831
50	48,9317	49,0049	0,0732
80	47,9875	48,0674	0,0799
		Promedio	0,0787

Para determinar los sólidos totales se ha utilizado la ecuación (13).

$$\text{Sólidos totales (mg/L)} = \frac{\text{Muestra} \times 1000}{0,5}$$

$$S T \text{ (mg/L)} = \frac{(0,0787) 1000}{0,5}$$

$$S T (mg/L) = 157,4 = 0,1574 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 32

Sólidos totales a la salida del desarenador

Altura de muestreo (cm)	Masa de crisol (g)	Masa de crisol + muestra (g)	Masa de la muestra (g)
20	47,5396	47,5887	0,0516
30	48,0074	48,0610	0,0536
50	47,2967	47,3506	0,0539
		Promedio	0,0530

$$Sólidos totales (mg/L) = \frac{Muestra \times 1000}{0,5}$$

$$S T (mg/L) = \frac{(0,0530) 1000}{0,5}$$

$$S T (mg/L) = 106,0 = 0,106 \text{ kg/m}^3$$

Para poder calcular la acumulación de sólidos totales presentes en el desarenador se ha aplicado la siguiente ecuación (28) de la misma manera se ha utilizado esta ecuación para determinar la cantidad de arena pura.

$$Q_{in} C_{in} = \text{ACUMULACIÓN} + Q_{out} C_{out} \quad \dots (28)$$

$$AC = Q [C_{in} - C_{out}] \dots \dots \dots (VII) \quad \dots (29)$$

Donde:

AC : Acumulación de sólidos (kg/s)

Q : Caudal en el desarenador (m³/s)

C_{in} : Concentración en el ingreso al desarenador (kg/m³)

C_{out} : Concentración en la salida del desarenador (kg/m³)

$$AC = 0,466 \frac{m^3}{s} [0,1574 - 0,106] \frac{kg}{m^3}$$

$$AC = 0,02395 \text{ kg/s}$$

Ahora para determinar la cantidad de todos los sólidos en el tiempo se ha usado la ecuación (30)

$$CARGA = MASA \times TIEMPO \quad \dots (30)$$

$$CARGA = 0,02395 \frac{kg}{s} (604800)s = 14938,56 kg = 14,9386 ton \quad \text{Una semana}$$

$$CARGA = 0,02395 \frac{kg}{s} (1296000)s = 31039,2 kg = 31,0392 ton \quad \text{Quincenal}$$

$$CARGA = 0,02395 \frac{kg}{s} (2592000)s = 62078,4 kg = 62,0784 ton \quad \text{Mensual}$$

Para determinar la cantidad de arena pura acumulada en el desarenador se ha llevado los sólidos totales obtenidos a una mufla a una temperatura de 550 °C para poder eliminar las materias orgánicas presentes, la muestra se ha sometido como se aprecia en la figura 40. En la tabla 33 y 34 se muestra los resultados a la entrada y salida del desarenador.



Figura 40. Determinación de arena pura de materia orgánica

Tabla 33

Arena a la entrada del desarenador

Altura (cm)	Masa después de someter al horno (g)	Masa después de someter a la mufla (g)	Masa muestra (g)
20	48,0703	48,0087	0,06160
50	49,0049	48,9451	0,05980
80	48,0674	48,0063	0,06110
		Promedio	0,06083

$$\text{Arena Acumulada (mg/L)} = \frac{\text{Muestra} \times 1000}{0,5}$$

$$\text{Arena Acumulada (mg/L)} = \frac{(0,06083) 1000}{0,5}$$

$$\text{Arena Acumulada (mg/L)} = 121,66 = 0,12166 \text{ kg/m}^3$$

Tabla 34

Arena a la salida del desarenador

Altura	Masa después de someter al horno	Masa después de someter a la mufla	Masa muestra
(cm)	(g)	(g)	(g)
20	47,5887	47,5516	0,03710
30	48,0616	48,0207	0,04030
50	47,3506	47,3118	0,03880
		Promedio	0,03873

$$\text{Arena Acumulada (mg/L)} = \frac{\text{Muestra} \times 1000}{0,5}$$

$$\text{Arena Acumulada (mg/L)} = \frac{(0,03873) 1000}{0,5}$$

$$\text{Arena Acumulada (mg/L)} = 77,46 = 0,07746 \text{ kg/m}^3$$

Para determinar la acumulación de arena pura de la misma manera se ha aplicado la ecuación (29).

$$AC = 0,466 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} [0,12166 - 0,07746] \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$AC = 0,0206 \text{ kg/s}$$

Ahora para determinar la cantidad de arena pura en el tiempo se ha usado la ecuación (30)

$$CARGA = 0,0206 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (1296000)\text{s} = 26697,6 \text{ kg} = 26,6976 \text{ ton} \quad \text{Quincenal}$$

$$CARGA = 0,0206 \frac{\text{kg}}{\text{s}} (2592000)\text{s} = 53395,2 \text{ kg} = 53,3952 \text{ ton} \quad \text{Mensual}$$

5.3. EVALUACIÓN DEL HIDROCICLÓN

Para la evaluación del hidrociclón primero se tuvo que realizarse las siguientes instalaciones: instalación del sistema de captación, instalación del hidrociclón, instalación de la electrobomba sumergible, instalación del sistema de conducción, puntos de muestreo, puesta en marcha del hidrociclón, operación y mantenimiento del hidrociclón.

➤ Instalación del sistema de captación

La instalación del sistema de captación se ha realizado del primer canal de la unidad de desarenador, la información detallada se muestra en el ítem de instalación del sistema de captación en el capítulo III. La instalación se ha realizado como se puede ver en la figura 41.



Figura 41. Instalación del sistema de captación

➤ Instalación del hidrociclón

La instalación del equipo de hidrociclón se ha realizado entre la unidad de desarenador y el

lecho de secado, primero se ha instalado el módulo de soporte del hidrociclón como se puede ver en la siguiente figura.



Figura 42. Instalación del modulo

Luego se ha procedido con la instalación del equipo de hidrociclón, la información detallada se muestra en el ítem de instalación del hidrociclón en el capítulo III. La instalación se ha realizado como se puede ver en la figura 43.



Figura 43. Instalación del hidrociclón

➤ **Instalación de la electrobomba sumergible**

La electrobomba se ha sumergido incluido el soporte para garantizar su estabilidad durante el funcionamiento en el primer canal del desarenador, la información detallada se muestra en el ítem de instalación de la electrobomba sumergible en el capítulo III.

Antes del funcionamiento de la electrobomba esta tuvo que estar conectada a un pozo a tierra debido que ésta electrobomba estará sumergida en el agua residual del canal de desarenador y también por normas de seguridad que indica el catálogo de instalación de la electrobomba, de tal manera se procedió con la construcción del pozo a tierra como se aprecia en la figura 44.



Figura 44. Construcción del pozo a tierra

➤ **Instalación del sistema de conducción**

La instalación del sistema de conducción se ha realizado empleando un tubo PVC de dos pulgadas diámetro tanto para el ingreso al hidrociclón y salida superior (Overflow), la información detallada se muestra en el ítem de instalación del sistema de conducción en el capítulo III. La instalación se ha realizado como se puede ver en la figura 45.

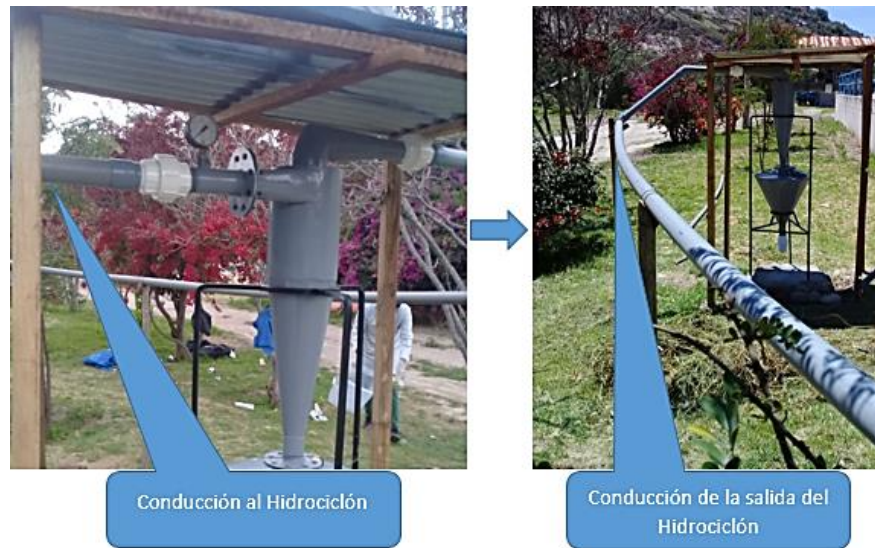


Figura 45. Instalación del sistema de conducción

➤ Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo se han realizado tanto para el afluente y efluente del hidrociclón. Como se puede ver la figura 46.



Figura 46. Puntos de muestreo

Donde:

P1. E : Punto de muestreo a la entrada del hidrociclón

P2. S1 : Punto de muestreo a la entrada por la parte superior (rebose)

P3. S2 : Punto de muestreo a la salida por la parte inferior (descarga)

➤ **Afluente del hidrociclón**

El agua residual contenidos de sólidos en suspensión proviene del primer canal del desarenador, ha sido captada de manera continuo con un caudal que varía desde 6 a 9 L/s, la información detallada se muestra en el ítem de afluente del hidrociclón en el capítulo III. El muestreo se ha realizado como se puede ver en la figura 47.



Figura 47. Puntos de muestreo antes del ingreso al hidrociclón

➤ **Efluente del hidrociclón**

Las muestras se han tomado en dos puntos como se aprecia en la figura 46, tanto de la salida superior y de la salida inferior.

La muestra del primer punto del efluente se ha tomado a la salida superior del hidrociclón exactamente a la entrada de la caja de distribución a los Tanque Imhoff, la información detallada se encuentra en el ítem de efluente del hidrociclón en el capítulo III. El muestreo se ha realizado como se puede ver en la figura 48.



Figura 48. Puntos de muestreo a la salida superior del hidrociclón

La muestra del segundo punto del efluente se ha tomado a la salida inferior del hidrociclón ósea a la salida del colector de arena, esta muestra obtenida y la muestra obtenida de la alimentación nos brindará el grado de remoción del equipo del hidrociclón. El muestreo se ha realizado como se observa en la siguiente figura



Figura 49. Puntos de muestreo a la salida inferior del hidrociclón

➤ Procedimientos de toma de muestras

Las muestras tomadas a la entrada del hidrociclón y a la salida superior de éste se ha realizado en botellas de vidrio de 475 mL, mientras las muestras a la salida inferior del hidrociclón se han tomado en un balde de 21 L todas bien rotuladas, la información detallada se encuentra en el ítem de procedimientos de toma de muestras en el capítulo III. Las muestras obtenidas se pueden ver en la figura 50.



Figura 50. Frascos con muestras

➤ Operación y mantenimiento del hidrociclón

La regulación del caudal es muy importante ya que el caudal alimentado tiene que ser constante, por esta razón se ha realizado varias mediciones de caudal, la información detallada se encuentra en el ítem de operación y mantenimiento del hidrociclón en el capítulo III. Las mediciones de caudal se hicieron como se puede ver en la figura 51.



Figura 51. Medición del caudal de ingreso

La presión de ingreso al hidrociclón se ha leído en el manómetro instalado a la entrada de la parte cilíndrica del hidrociclón como se puede apreciar en la figura 52.



Figura 52. Presión de ingreso

Para la evaluación del hidrociclón primero se ha medido el caudal de alimentación al hidrociclón llegando calibrar el caudal deseado para luego ponerlo en marcha por un hora, durante ese tiempo se muestrea a la entrada y en las dos salidas del equipo para determinar las concentraciones en cada punto. Los sólidos retirados de la parte inferior (rebose) del hidrociclón pasan por su respectivo secado, una vez secada los sólidos se realizó el pesado para saber cantidad exacta retirada en un hora de operación.

El mantenimiento de todo el sistema una vez finalizada la evaluación es de mucha importancia debido a que los sólidos son impregnados en todos los componentes del equipo como en las válvulas, accesorios, etc. La electrobomba es la que necesita más mantenimiento por eso se ha protegido con mallas con fines de retener partículas que no sean sólidos en suspensión como bolsas de plástico, guapes, etc. El mantenimiento se ha realizado como se puede ver en la figura 53.



Figura 53. Mantenimiento de la estructura de la electrobomba sumergible

➤ Evaluación de los parámetros de operación del hidrociclón

La evaluación del hidrociclón se ha realizado a cuatro caudales de alimentación como son: 6,3466; 7,0931; 8,2721 y 9,1660 L/s, con el objetivo de determinar los parámetros de operación cuyos resultados para cada caudal se detalla a continuación:

a) Caudal 6,3466 L/s

La medición del flujo en la alimentación y rebose o derrame se pueden apreciar en la tabla 35, en ambas corrientes la variación es muy baja de igual manera se procedió a sacar un promedio para la representación de manera general.

Tabla 35

Determinación de caudal promedio (Caudal 6,3466 L/s)

Ensayo	Caudal en la alimentación (L/s)	Caudal en el rebose (L/s)
1	6,4015	5,2739
2	6,2980	5,3613
3	6,2206	5,3333
4	6,3288	5,2914
5	6,4839	5,3021
Promedio	6,3466	5,3124

Hora inicio de la operación : 9:59 a.m.

Hora final de la operación : 10:59 a.m.

Tiempo hidráulico (TH) : 1,48 s

Presión de ingreso : 4 psi

El trabajo se ha realizado sacando una muestra de 40 mL, de cada punto de muestreo para determinar la concentración tanto de sólido y de arena pura.

Donde:

1. Alimentación (INLET) al hidrociclón (F)
2. Rebose (OVERFLOW) del hidrociclón (R)
3. Descarga (UNDERFLOW) del hidrociclón (D)

El balance de materia en el hidrociclón es de mucha importancia para saber la cantidad que entra y la cantidad que sale, la cantidad de entrada y salida debe ser los mismo, en cierto caso experimental esto ocurre con poca perdida de muestras.

En esta evaluación del hidrociclón se ha realizado un balance general de la entrada y salida del equipo, balance en función a los sólidos totales y balance en función a la arena pura como se aprecia las ecuaciones 31, 32 y 33.

➤ **Balance general en el hidrociclón**

$$F = R + D \quad \dots (31)$$

Donde:

F : Caudal de alimentación (Inlet) (L/s)

R : Caudal en el rebose (Overflow) (L/s)

D : Caudal en la descarga (Underflow) (L/s)

➤ **Balance de sólidos totales en el hidrociclón**

$$F_C \times F = R_C \times R + D_C \times D \quad \dots (32)$$

Donde:

C_{XF} : Concentración de sólidos totales en la alimentación

C_{XR} : Concentración de sólidos totales en el rebose

C_{XD} : Concentración de sólidos totales en la descarga

➤ Balance de arena pura en el hidrociclón

$$F_{CYF} = R_{CYR} + D_{CYD} \quad \dots (33)$$

Donde:

C_{YF} : Concentración de arena pura en la alimentación

C_{YR} : Concentración de arena pura en el rebose

C_{YD} : Concentración de arena pura en la descarga

En la figura 54 se presenta el caudal y las concentraciones tanto de sólidos totales y arenas en la alimentación, en el rebose y descarga.

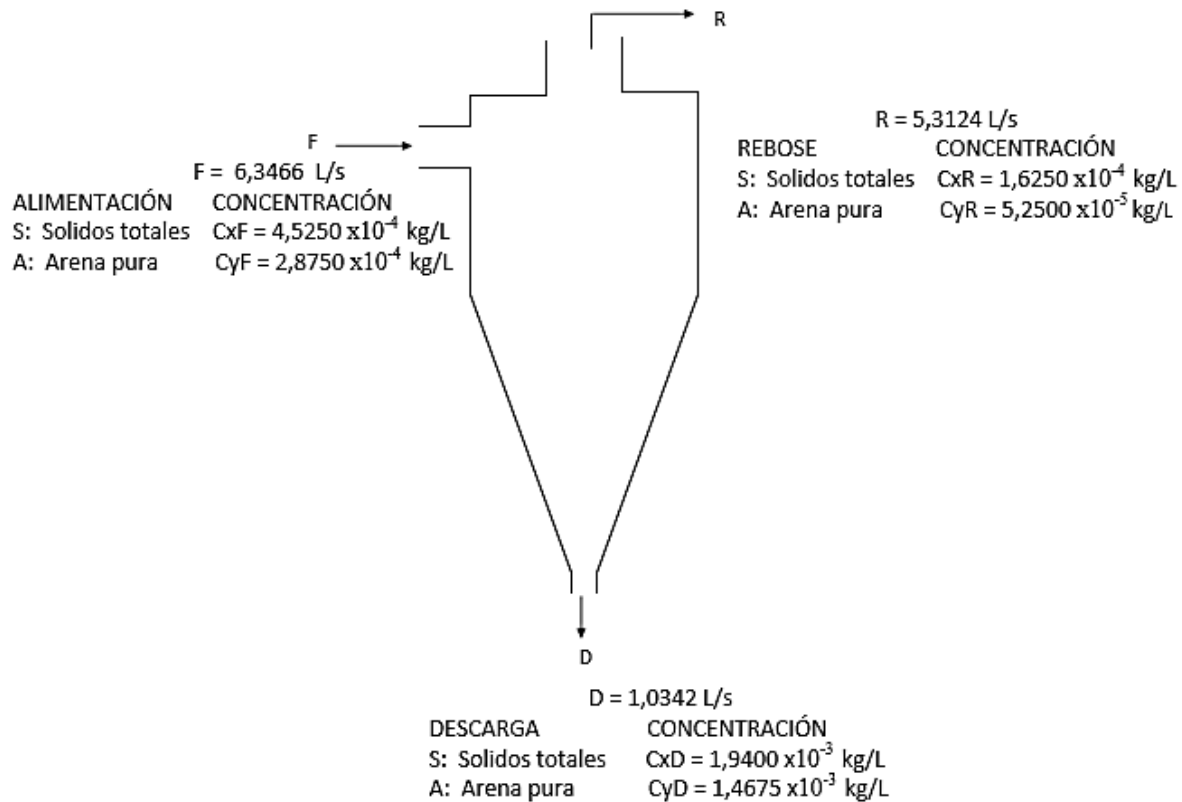


Figura 54. Representación esquemática del balance de materia para F= 6,3466 L/s

Para determinar la concentración tanto de sólidos y arena pura en las muestras se aplicaron la técnica de sólidos totales indicada en el capítulo de metodología. Los resultados se presentan en la tabla 36.

Tabla 36*Concentraciones para caudal 6,3466 L/s*

Concentración	Alimentación (g/mL)	Rebose (g/mL)	Descarga (g/mL)
Sólido total	$4,5250 \times 10^{-4}$	$1,6250 \times 10^{-4}$	$1,9400 \times 10^{-3}$
Arena pura	$2,8750 \times 10^{-4}$	$5,2500 \times 10^{-5}$	$1,4675 \times 10^{-3}$

El flujo másico de sólidos totales y arena pura se ha determinado con la ecuación (34).

$$\dot{m}_S = Q \cdot (C_X) \quad \dots (34)$$

Donde:

$\dot{m}_S$: Flujo másico (kg/s)

Q : Caudal (L/s)

C_X : Concentración (kg/L)

Tabla 37*Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 6,3466 L/s*

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	6,3466	$4,5250 \times 10^{-4}$	$2,8718 \times 10^{-3}$
Rebose	5,3124	$1,6250 \times 10^{-4}$	$8,6327 \times 10^{-4}$
Descarga	1,0342	$1,9400 \times 10^{-3}$	$2,0063 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para sólidos totales (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 37) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $2,8718 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $8,6327 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $2,0063 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$2,8718 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 8,6327 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 2,0085 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $2,0085 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$
Descarga retirado del colector : $2,0063 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $2,2 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Para la determinación de arena pura en la muestra se ha sometido en una mufla a 550°C , quedando solo arena pura a esta temperatura.

Tabla 38

Determinación de flujo másico de arena pura para caudal $6,3466 \text{ L/s}$

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	6,3466	$2,8750 \times 10^{-4}$	$1,8246 \times 10^{-3}$
Rebose	5,3124	$5,2500 \times 10^{-5}$	$3,0546 \times 10^{-4}$
Descarga	1,0342	$1,4675 \times 10^{-3}$	$1,5177 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para arena pura (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 38) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $1,8246 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $3,0546 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $1,5177 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$1,8246 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 3,0546 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,5191 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $1,5191 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $1,5177 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $1,4 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Cantidad de sólido retirado en la descarga en 1 hora de operación

Masa de sólido retirado = 7,2227 kg

Se ha tomado 6 g de muestra del sólido retirado, para poder determinar cuantas de esta cantidad acumulada es arena pura, para eso se ha llevado a una mufla a 550 °C por 20 minutos en donde solo ha quedado la arena a esta temperatura, los sólidos orgánicos se volatilizaron.

Tabla 39

Determinación de porcentaje de arena en la descarga para F= 6,3466 L/s

Masa de crisol	Masa de crisol + muestra	Masa de crisol + muestra después de la mufla	Masa de arena	% Peso de arena
(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
25,1008	31,1008	26,5624	4,5384	75,64

Entonces la cantidad de arena pura retirada en 1 hora de operación fue:

Masa de arena = 7,2227 kg (0,7564) = 5,4632 kg

La eficiencia se ha determinado en función a la arena en la descarga.

EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN

$$E = \frac{\text{Flujo másico UNDERFLOW (arena) (kg/s)}}{\text{Flujo másico alimentación (sólido total) (kg/s)}} \times 100$$

$$E = \frac{1,5177 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{2,8718 \times 10^{-3} \text{ kg/s}} \times 100$$

$$E = 52,85 \%$$

b) Caudal 7,0931 L/s

La medición del flujo en la alimentación y rebose o derrame se pueden apreciar en la tabla 40, en ambas corrientes la variación es muy baja de igual manera se procedió a sacar un promedio para la representación de manera general.

Tabla 40*Determinación de caudal promedio (Caudal 7,0968 L/s)*

Ensayo	Caudal de alimentación (L/s)	Caudal en el rebose (L/s)
1	7,0968	5,8539
2	7,0652	5,8746
3	7,1338	5,8551
4	7,1001	5,8412
5	7,0697	5,8489
Promedio	7,0931	5,8547

Hora inicio de la operación : 9:13 a.m.

Hora final de la operación : 10:13 a.m.

Tiempo hidráulico (TH) : 1,43 s

Presión de ingreso : 5 psi

EL trabajo se ha realizado sacando una muestra de 40 mL, de cada punto de muestreo para determinar la concentración tanto de sólido y de arena pura.

Donde:

- 1: Alimentación (INLET) al hidrociclón (F)
- 2: Rebose (OVERFLOW) del hidrociclón (R)
- 3: Descarga (UNDERFLOW) del hidrociclón (D)

En la figura 55 se muestra el caudal y las concentraciones tanto de sólidos totales y arenas en la alimentación, en el rebose y descarga.

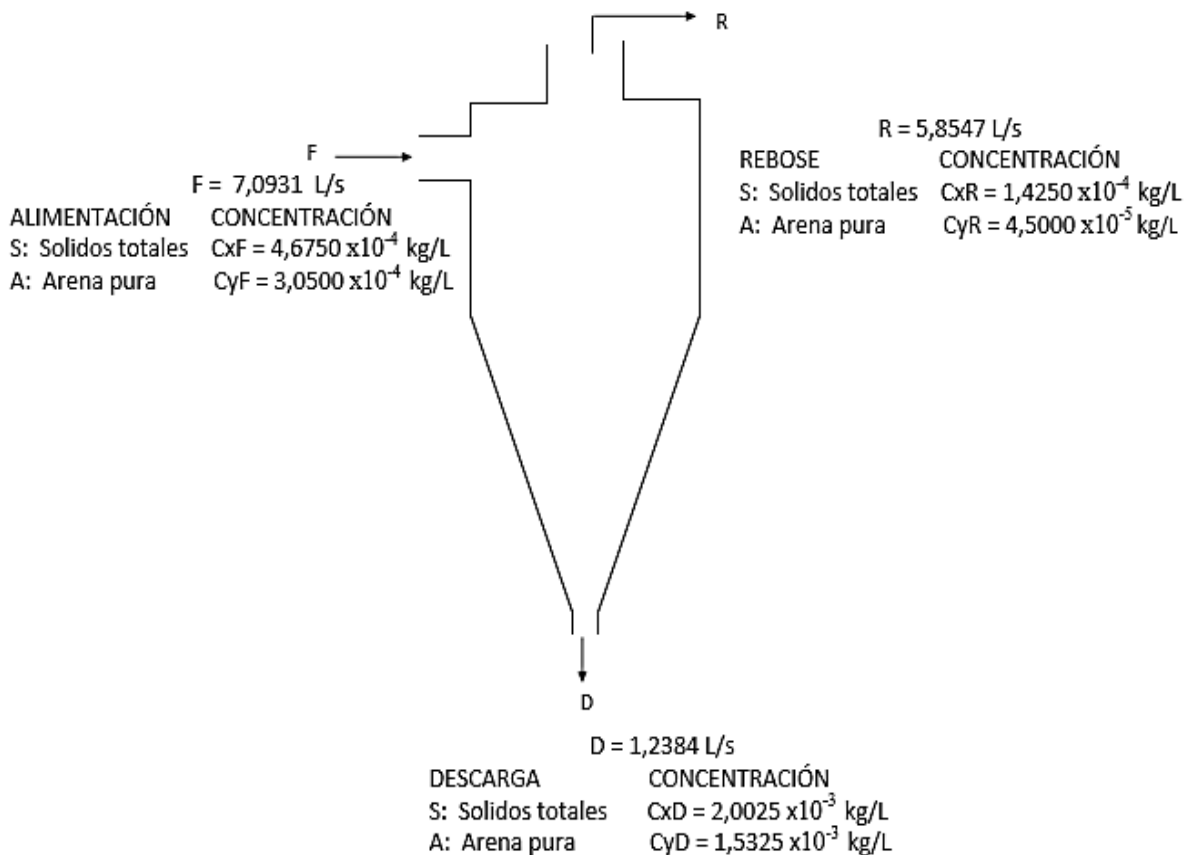


Figura 55. Representación esquemática del balance de materia para $F = 7,0931$ L/s

Para determinar la concentración tanto de sólidos y arena pura en las muestras se aplicaron la técnica de sólidos totales indicada en el capítulo de metodología. Los resultados se presentan en la tabla 41.

Tabla 41

Concentraciones para caudal 7,0931 L/s

Concentración	Alimentación (g/mL)	Rebose (g/mL)	Descarga (g/mL)
Sólido total	$4,6750 \times 10^{-4}$	$1,4250 \times 10^{-4}$	$2,0025 \times 10^{-3}$
Arena pura	$3,0500 \times 10^{-4}$	$4,5000 \times 10^{-5}$	$1,5325 \times 10^{-3}$

Para calcular el flujo másico se ha utilizado la misma ecuación (34).

Tabla 42*Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 7,0931 L/s*

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	7,0931	$4,6750 \times 10^{-4}$	$3,3160 \times 10^{-3}$
Rebose	5,8547	$1,4250 \times 10^{-4}$	$8,3429 \times 10^{-4}$
Descarga	1,2384	$2,0025 \times 10^{-3}$	$2,4799 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para sólidos totales (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 42) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $3,3160 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $8,3429 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $2,4799 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$3,3160 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 8,3429 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 2,4817 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $2,4817 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $2,4799 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $1,8 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Para la determinación de arena pura en la muestra se ha sometido en una mufla a 550°C los resultados obtenidos se muestra en la tabla 43.

Tabla 43*Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 7,0931 L/s*

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	7,0931	$3,0500 \times 10^{-4}$	$2,1634 \times 10^{-3}$
Rebose	5,8547	$4,5000 \times 10^{-5}$	$2,6346 \times 10^{-4}$
Descarga	1,2384	$1,5325 \times 10^{-3}$	$1,8978 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para arena pura (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 43) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $2,1634 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $2,6346 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $1,8978 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$2,1634 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 2,6346 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 1,8999 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $1,8999 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $1,8978 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $2,1 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Cantidad de sólido retirado en 1 hora de operación

Masa de sólido retirado = $8,9276 \text{ kg}$

Se ha tomado 6 g de muestra del sólido retirado, para poder determinar cuantas de esta cantidad acumulada es arena pura, para eso se ha llevado a una mufla a 550°C por 20 minutos en donde solo ha quedado la arena pura a esta temperatura, los sólidos orgánicos se volatilizaron.

Tabla 44

Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F = 7,0931 \text{ L/s}$

Masa de crisol	Masa de crisol + muestra	Masa de crisol + muestra después de la mufla	Masa de arena	% Peso de arena
(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
26,0004	32,0004	27,4098	4,5906	76,51

Entonces la cantidad de arena pura retirada en 1 hora de operación fue:

Masa de arena = $8,9276 \text{ kg} (0,7651) = 6,8305 \text{ kg}$

EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN

$$E = \frac{\text{Flujo másico UNDERFLOW (arena) (kg/s)}}{\text{Flujo másico alimentación (sólido total) (kg/s)}} \times 100$$

$$E = \frac{1,8978 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{3,3160 \times 10^{-3} \text{ kg/s}} \times 100$$

$$E = 57,23 \%$$

c) Caudal 8,2721 L/s

La medición del flujo en la alimentación y rebose o derrame se pueden apreciar en la tabla 45, en ambas corrientes la variación es muy baja de igual manera se procedió a sacar un promedio para la representación de manera general.

Tabla 45

Determinación de caudal promedio (Caudal 8,2721 L/s)

Ensayo	Caudal de alimentación (L/s)	Caudal en el rebose (L/s)
1	8,2513	6,9259
2	8,2727	6,6928
3	8,3015	6,8463
4	8,2747	6,9012
5	8,2602	6,7289
Promedio	8,2721	6,8190

Hora inicio de la operación : 9.43 a.m.

Hora final de la operación : 0.43 a.m.

Tiempo hidráulico (TH) : 1,36 s

Presión de ingreso : 7 psi

EL trabajo se ha realizado sacando una muestra de 40 mL, de cada punto de muestreo para determinar la concentración tanto de sólido y arena pura.

Donde:

- 1: Alimentación (INLET) al hidrociclón (F)
- 2: Rebose (OVERFLOW) del hidrociclón (R)
- 3: Descarga (UNDERFLOW) del hidrociclón (D)

En la figura 56 se muestra el caudal y las concentraciones tanto de sólidos totales y arenas en la alimentación, en el rebose y descarga.

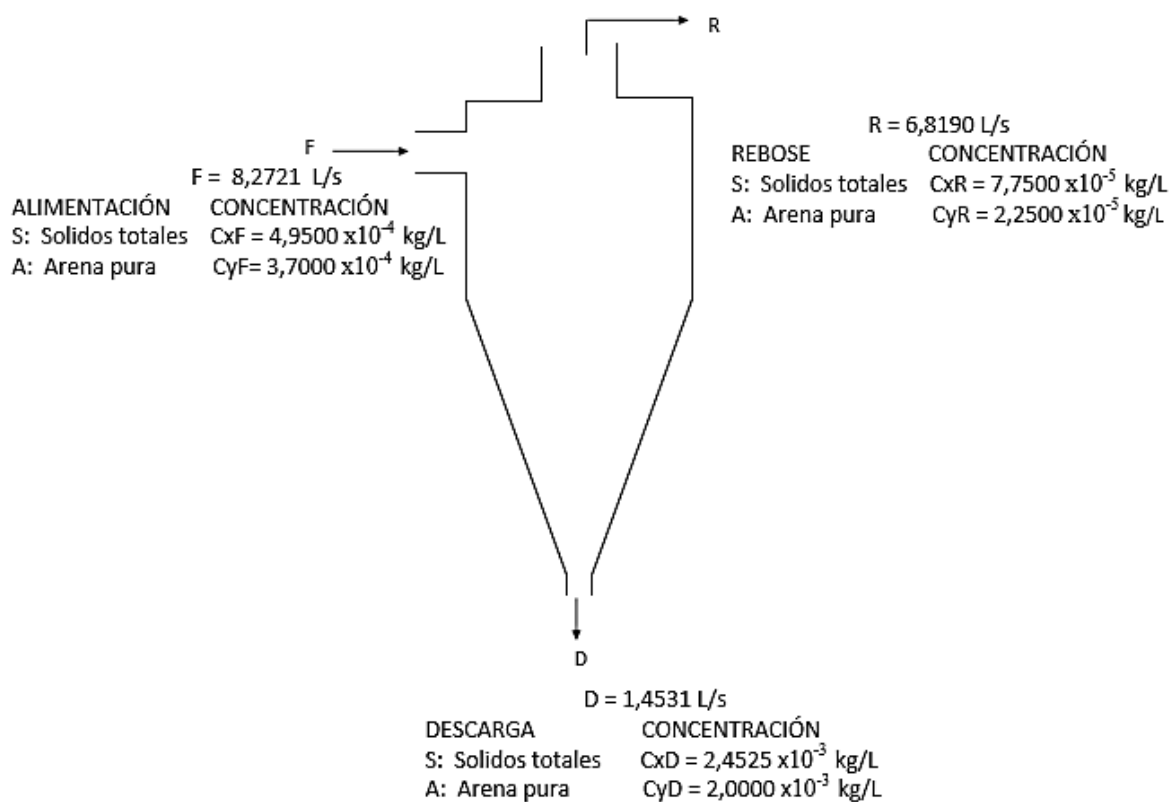


Figura 56. Representación esquemática del balance de materia para $F = 8,2721 \text{ L/s}$

Para determinar la concentración tanto de sólidos y arena pura en las muestras se aplicaron la técnica de sólidos totales indicada en el capítulo de metodología. Los resultados se presentan en la tabla 46.

Tabla 46*Concentraciones para caudal 8,2721 L/s*

Concentración	Alimentación (g/mL)	Rebose (g/mL)	Descarga (g/mL)
Sólido total	$4,9500 \times 10^{-4}$	$7,7500 \times 10^{-5}$	$2,4525 \times 10^{-3}$
Arena pura	$3,7000 \times 10^{-4}$	$2,2500 \times 10^{-5}$	$2,0000 \times 10^{-3}$

De la misma manera se ha utilizado la ecuación (34) para calcular el flujo másico.

Tabla 47*Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 8,2721L/s*

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	8,2721	$4,9500 \times 10^{-4}$	$4,0947 \times 10^{-3}$
Rebose	6,8190	$7,7500 \times 10^{-5}$	$5,2847 \times 10^{-4}$
Descarga	1,4531	$2,4525 \times 10^{-3}$	$3,5637 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para sólidos totales (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 47) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $4,0947 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $5,2847 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $3,5637 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$4,0947 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 5,2847 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 3,5662 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $3,5662 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $3,5637 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $2,5 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Para la determinación de arena pura en la muestra se ha sometido en una mufla a 550°C , los

resultados se muestran en la tabla 48.

Tabla 48

Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 8,2721 L/s

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	8,2721	$3,7000 \times 10^{-4}$	$3,0607 \times 10^{-3}$
Rebose	6,8190	$2,2500 \times 10^{-5}$	$1,5343 \times 10^{-4}$
Descarga	1,4531	$2,0000 \times 10^{-3}$	$2,9062 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para arena pura (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 48) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $3,0607 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $1,5343 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $2,9062 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$3,0607 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 1,5343 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 2,9073 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $2,9073 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $2,9062 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $1,1 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Cantidad de sólido retirado en 1 hora de operación

Masa de sólido retirado = $12,8293 \text{ kg}$

Se ha tomado 6 g de muestra del sólido retirado, para poder determinar cuantas de esta cantidad acumulada es arena pura, para eso se ha llevado a una mufla a 550°C por 20 minutos en donde solo ha quedado la arena a esta temperatura, los sólidos orgánicos se volatilizaron.

Tabla 49*Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F = 8,2721 \text{ L/s}$*

Masa de crisol	Masa de crisol + muestra	Masa de crisol + muestra después de la mufla	Masa de arena	% Peso de arena
(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
27,0010	33,0010	28,1068	4,8942	81,57

Entonces la cantidad de arena pura retirada en 1 hora de operación fue:

$$\text{Masa de arena} = 12,8293 \text{ kg} (0,8157) = 10,4649 \text{ kg}$$

Para la determinación de la eficiencia del hidrociclón en función a la arena se ha utilizado la siguiente ecuación:

EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN

$$E = \frac{\text{Flujo másico UNDERFLOW (arena) (kg/s)}}{\text{Flujo másico alimentación (sólido total) (kg/s)}} \times 100$$

$$E = \frac{2,9062 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{4,0947 \times 10^{-3} \text{ kg/s}} \times 100$$

$$E = 70,97 \%$$

Para determinar la eficiencia del hidrociclón en función al sólido total se ha utilizado la misma ecuación:

EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN

$$E = \frac{\text{Flujo másico descarga (sólido total) (kg/s)}}{\text{Flujo másico alimentación (sólido total) (kg/s)}} \times 100$$

$$E = \frac{3,5637 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{4,6059 \times 10^{-3} \text{ kg/s}} \times 100$$

$$E = 77,37 \%$$

d) Caudal 9,1660 L/s

La medición del flujo en la alimentación y rebose se pueden apreciar en la tabla 50, en ambas corrientes la variación es muy baja de igual manera se procedió a sacar un promedio para la representación de manera general.

Tabla 50*Determinación de caudal promedio (Caudal 9,1660 L/s)*

Ensayo	Caudal de alimentación (L/s)	Caudal en el rebose (L/s)
1	9,1806	7,4824
2	9,1536	7,4790
3	9,2000	7,5047
4	9,1511	7,4812
5	9,1449	7,4989
Promedio	9,1660	7,4892

Hora inicio de la operación : 9:32 a.m.

Hora final de la operación : 10:32 a.m.

Tiempo hidráulico (TH) : 1,25 s

Presión de ingreso : 9 psi

EL trabajo se ha realizado sacando una muestra de 40 mL, de cada punto de muestreo para determinar la concentración tanto de sólido y arena pura.

Donde:

1. Alimentación (INLET) al hidrociclón (F)
2. Rebose (OVERFLOW) del hidrociclón (R)
3. Descarga (UNDERFLOW) del hidrociclón (D)

En la figura 57 se muestra el caudal y las concentraciones tanto de sólidos totales y arenas en la alimentación, en el rebose y descarga.

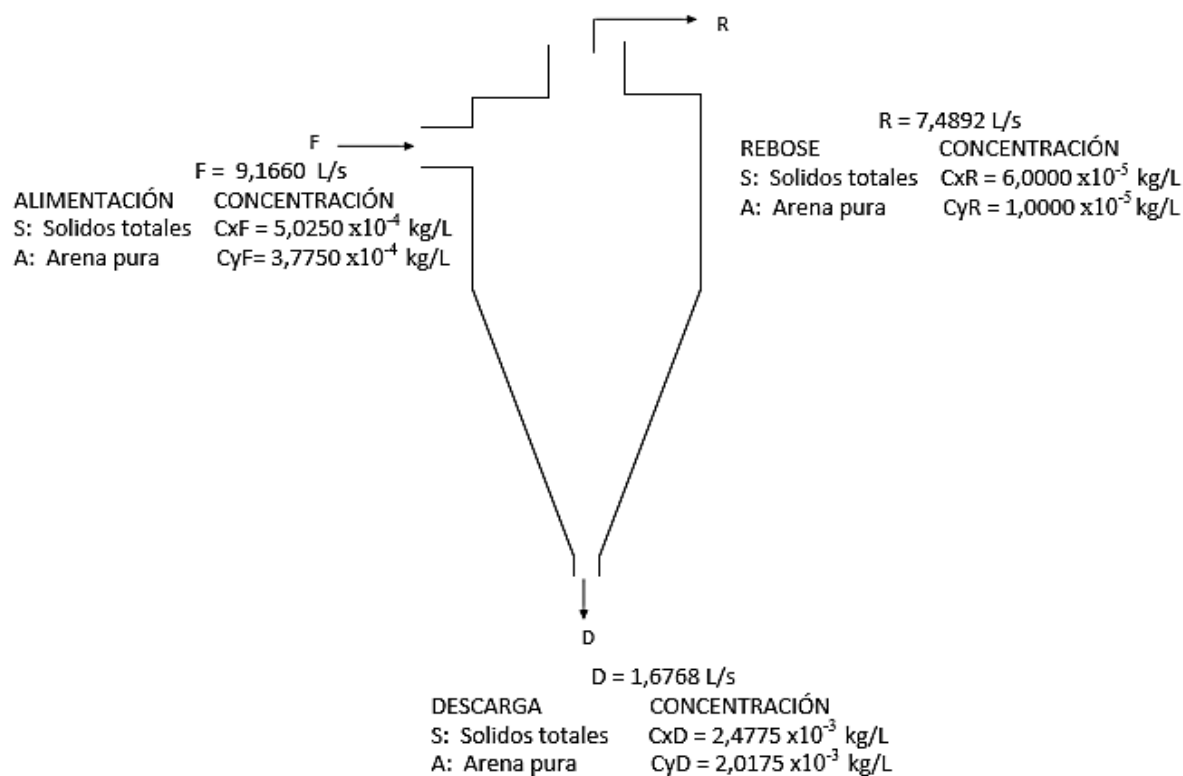


Figura 57. Representación esquemática del balance de materia para $F = 9,1660 \text{ L/s}$

Para determinar la concentración tanto de sólidos y arena pura en las muestras se aplicaron la técnica de sólidos totales indicada en el capítulo de metodología. Los resultados se presentan en la tabla 51.

Tabla 51

Concentraciones para caudal 9,1660 L/s

Concentración	Alimentación (g/mL)	Rebose (g/mL)	Descarga (g/mL)
Sólido total	$5,0250 \times 10^{-4}$	$6,0000 \times 10^{-5}$	$2,4775 \times 10^{-3}$
Arena pura	$3,7750 \times 10^{-4}$	$1,0000 \times 10^{-5}$	$2,0175 \times 10^{-3}$

El flujo másico de sólidos totales y arena pura se ha calculado con la misma ecuación (34).

Tabla 52*Determinación de flujo másico de sólidos totales para caudal 9,1660 L/s*

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	9,1660	$5,0250 \times 10^{-4}$	$4,6059 \times 10^{-3}$
Rebose	7,4892	$6,0000 \times 10^{-5}$	$4,4935 \times 10^{-4}$
Descarga	1,6768	$2,4775 \times 10^{-3}$	$4,1543 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para sólidos totales (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 52) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $4,6059 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $4,4935 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$

Descarga : $4,1543 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$4,6059 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 4,4935 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 4,1566 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $4,1566 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $4,1543 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $2,3 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Para la determinación de arena pura en la muestra se ha sometido en una mufla a 550°C , los resultados se muestran en la tabla 53.

Tabla 53*Determinación de flujo másico de arena pura para caudal 9,1660 L/s*

	Caudal (L/s)	Concentración (kg/L)	Flujo másico (kg/s)
Alimentación	9,1660	$3,7750 \times 10^{-4}$	$3,4602 \times 10^{-3}$
Rebose	7,4892	$1,0000 \times 10^{-5}$	$7,4892 \times 10^{-5}$
Descarga	1,6768	$2,0175 \times 10^{-3}$	$3,3829 \times 10^{-3}$

➤ **Balance para arena pura (flujo másico)**

El flujo másico en la entrada y salida del hidrociclón (tabla 53) se ha utilizado para hacer el balance de masa.

Alimentación : $3,4602 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Rebose : $7,4892 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$

Descarga : $3,3829 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Haciendo el balance de masa con la alimentación y el rebose.

$$3,4602 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{s}} - 7,4892 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{s}} = 3,3853 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$$

Descarga calculado por balance : $3,3853 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Descarga retirado del colector : $3,3829 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$

Por diferencia hay una pérdida de $2,4 \times 10^{-6} \text{ kg/s}$, esto indica una perdida muy baja en el balance de masa.

Cantidad de sólido retirado en 1 hora de operación

Masa de sólido retirado = $14,9555 \text{ kg}$

Se ha tomado 6 g de muestra del sólido retirado, para poder determinar cuantas de esta cantidad acumulada es arena pura, para eso se ha llevado a una mufla a 550°C por 20 minutos en donde solo ha quedado la arena a esta temperatura, los sólidos orgánicos se volatilizaron.

Tabla 54

Determinación de porcentaje de arena en la descarga para $F = 9,1660 \text{ L/s}$

Masa de crisol	Masa de crisol + muestra	Masa de crisol + muestra después de la mufla	Masa de arena	% Peso de arena
(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
25,0018	31,0018	26,1154	4,8864	81,44

Entonces la cantidad de arena pura retirado en 1 hora de operación fue:

Masa de arena = $14,9555 \text{ kg} (0,8144) = 12,1798 \text{ kg}$

Para la determinación de la eficiencia del hidrociclón en función a la arena se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} & \text{EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN} \\ E &= \frac{\text{Flujo másico descarga (arena) (kg/s)}}{\text{Flujo másico alimentación (sólido total) (kg/s)}} \times 100 \\ E &= \frac{3,3829 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{4,6059 \times 10^{-3} \text{ kg/s}} \times 100 \\ E &= 73,45 \% \end{aligned}$$

Para determinar la eficiencia del hidrociclón en función al sólido total se ha utilizado la misma ecuación:

$$\begin{aligned} & \text{EFICIENCIA DEL HIDROCICLÓN} \\ E &= \frac{\text{Flujo másico descarga (sólido total) (kg/s)}}{\text{Flujo másico alimentación (sólido total) (kg/s)}} \times 100 \\ E &= \frac{4,1543 \times 10^{-3} \text{ kg/s}}{4,6059 \times 10^{-3} \text{ kg/s}} \times 100 \\ E &= 90 \% \end{aligned}$$

5.3.1. Resumen de resultados experimentales

En la tabla 55, se muestran los resultados experimentales de la evaluación de los parámetros de operación del hidrociclón de los diferentes puntos de muestreo, los cuales corresponden a los resultados obtenidos durante una hora de operación, ya que a estas condiciones el hidrociclón alcanzó su máxima eficiencia.

Bajo esta condición de operación el hidrociclón estuvo en funcionamiento durante dos semanas, de los cuales cuatro días se ha tomado como evaluación de tiempo completo de una hora, ya que una semana se ha buscado la estabilidad de tiempo debido a los problemas que presento la electrobomba y los problemas del propio desarenador que no está trabajando correctamente, cuyas variables de operación se ha evaluado una vez al día.

Tabla 55*Resumen de los resultados experimentales*

Ensayo	Caudal de ingreso (L/s)	Presión de ingreso (psi)	Grado de remoción (%)
1	6,3466	4	52,85
2	7,0931	5	57,23
3	8,2721	7	70,97
4	9,1660	9	73,45

5.3.2. Determinación de parámetros óptimos del hidrociclón

La determinación de los parámetros óptimos se ha realizado en base al grado de remoción de arenas como indica (Rietema & Verver, 1961) y aplicando el método práctico (prueba error) dando como resultado la elección de los siguientes parámetros:

➤ Elección del caudal

Las condiciones de trabajo de la elección de caudal de alimentación al hidrociclón fueron: caudal 9,1660 L/s, tiempo hidráulico 1,25 segundos es el tiempo que demora en salir por el rebose.

➤ Presión

Habiendo determinado el caudal óptimo se procedió a ver la presión de ingreso en el manómetro, la presión es 9 psi.

5.3.3. Determinación de turbiedad

La determinación de turbiedad, estas pruebas fueron realizadas con el instrumento llamado turbidímetro, donde las muestras fueron tomadas en el ingreso y salida (rebose) del hidrociclón. mayor detalle en la tabla 56.

Tabla 56*Determinación de turbiedad en la entrada y salida superior del hidrociclón*

Ensayo	Caudal ingreso (L/s)	Turbiedad ingreso (NTU)	Turbiedad salida (NTU)
1	6,3466	354	248
2	7,0931	359	239
3	8,2721	363	226
4	9,1660	369	198

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. GRANULOMETRÍA

No hay una Norma específica para la granulometría de las arenas del desarenador, por lo tanto, se ha tomado la Norma ASTM C 33 donde se estipulan los requisitos que permiten una relativa amplitud de variación en la granulometría del agregado fino, se ha aplicado esta Norma debido a que en el desarenador no se ha encontrado gravas solamente arenas finas que son nada menos agregados finos con diferencia que estas arenas están contenidos de materia orgánica.

La muestra (arena) del desarenador se ha realizado un previo lavado con HCl (1:1) con agua debido a que la arena estuvo contaminada con materia orgánica.

El resultado de la granulometría indica que es demasiado la finura de las arenas del desarenador, dando como diámetro mínimo 0,0071 cm y como diámetro máximo 0,1 cm. De acuerdo a la figura 58 se interpreta que el 0,035 % de arenas son retenidas en la malla de 1 mm y el mayor porcentaje que es 51,24 % son las retenidas en la malla 0,071 mm, indica que este tamaño es la que esta acumulada en mayor cantidad en el fondo del desarenador.

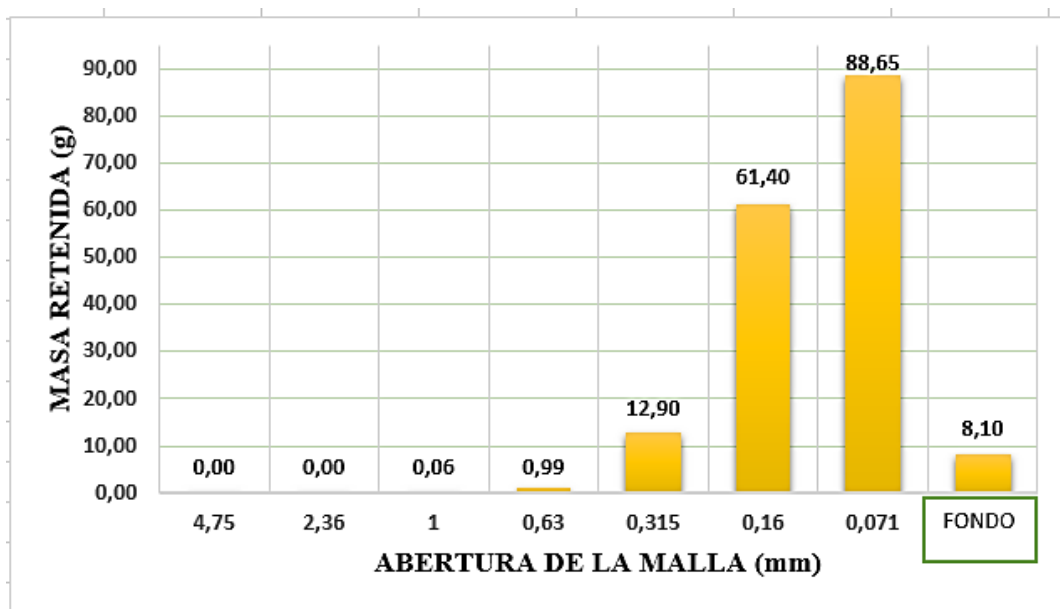


Figura 58. Cantidad de masa retenida en función a la abertura de la malla.

6.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

Las características físicas de las arenas residuales provenientes de la unidad de desarenador de la PTAR “La Totorá”, sus resultados están representados en la tabla 57.

Fue muy importante el estudio de la caracterización de las arenas residuales para poder determinar los parámetros de evaluación del desarenador.

Tabla 57

Características físicas de las arenas residuales

Arenas residuales de la PTAR “La Totorá”

Color	Gris oscuro
Olor	Fétido, nauseabundo
Forma	Circular
Textura	Duro
Apariencia	Grano fino
Impurezas	Alto contenido de impurezas
Densidad aparente	1,1836 g/mL
Gravedad específica	2,6208
Humedad	82,87 %

La caracterización física de las arenas residuales de la unidad de desarenador de la PTAR “La Totorá” ha presentado los siguientes resultados: Densidad aparente 1,1836 g/ml, gravedad específica 2,6208 y humedad 82,87 %.

En la literatura la gravedad específica de la arena pura es de 2,65 en cambio en el trabajo realizado se ha reportado 2,6208, este valor debido a que la arena contiene materia orgánica, material particulado, entre otros, contenidos estas partículas la arena tiende a flotar en el agua y es causante de esta gravedad obtenida.

6.3. CARACTERÍSTICA QUÍMICA

6.3.1. Determinación de la materia orgánica

Se ha obtenido un promedio de 10,7 % de materia orgánica presente en las arenas residuales retiradas de la unidad de desarenador. (tabla 22).

La composición de materia orgánica presente en las arenas retiradas de la unidad de desarenador es variada por diferentes aspectos y factores como: temporada de estiaje, temporada de lluvia y manejo de la unidad de desarenador.

6.4. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL CANAL DEL DESARENADOR

Los parámetros obtenidos son del funcionamiento del desarenador que actualmente opera la PTAR Totorá.

En la figura 59 se muestra la cantidad de sólidos que se acumulan en el desarenador, se ha realizado esta medida en el momento de la descarga de los sólidos acumulados.

se ha observado que el flujo del agua residual solo tiene una altura de 60 cm, lo cual nos ha indicado que a medida que se reduce la altura o área de flujo del agua residual, las arenas de menores diámetros no llegan a sedimentar por el aumento de la velocidad longitudinal del desarenador, la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” el retiro de los sólidos acumulados en el desarenador lo realiza mensual en temporadas de estiaje y en temporada de lluvia lo realizan dos veces por mes.

La altura de los sólidos totales acumulados es de 1,15 m promedio durante un mes de operación en temporada de lluvia, la altura total del interior del desarenador hasta la superficie es 2,50 m.

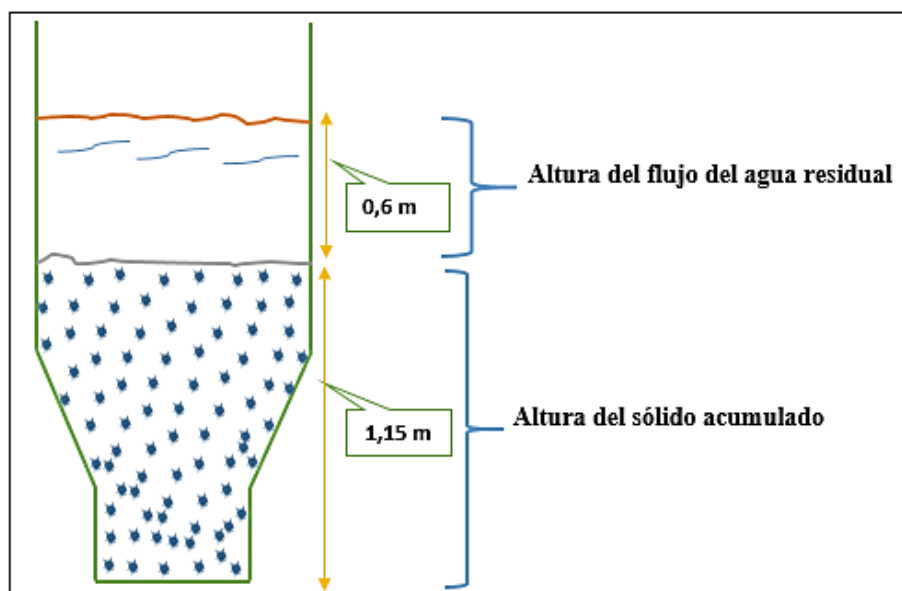


Figura 59. Cantidad de sólidos acumulados en el desarenador

6.4.1. Velocidad longitudinal con técnica de sin aforo.

La velocidad longitudinal evaluada con tres esferas, de los cuales dos son de material tecnopor y uno de polietileno, el resultado obtenido de las tres esferas solo uno presenta poco error y es la de material de polietileno que da como resultado 0,2758 m/s, sin embargo, esta velocidad se da solo en la superficie del agua residual mas no a diferentes alturas de profundidad, comparando con la evaluación de la velocidad longitudinal determinada con área y caudal el resultado es 0,2654 m/s la diferencia de estos valores es muy notorio, por tal motivo no se ha trabajado con esta técnica debido a que no brinda resultados exactos.

6.4.2. Comportamiento de la velocidad longitudinal en función al área y caudal

Se ha evaluado en el periodo de mes octubre y se ha realizado con una frecuencia de interdiarios por las mañanas en hora punta. para ver cómo está trabajando el desarenador en esas circunstancias.

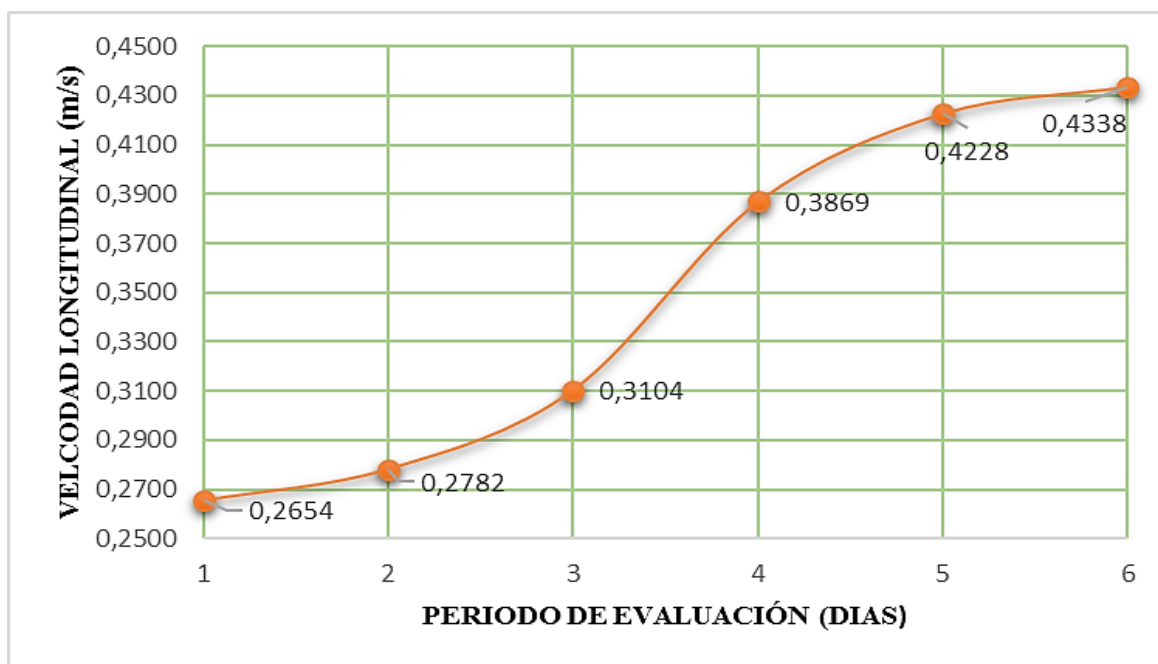


Figura 60. Comportamiento de la velocidad longitudinal en función al área y caudal

En la figura 60 la velocidad longitudinal del desarenador se ha llegado a notar que desde 0,3104 m/s hay un aumento demasiado de velocidad y esta causa es por el aumento del caudal, los desniveles de altura del flujo de agua residual en los 30 m de longitud hicieron un demasiado incremento de velocidad del flujo del agua del desarenador y así reduciendo el área de flujo del agua residual, debido a la fuerte lluvia ocurrido durante esa semana.

Llegando hasta 0,4338 m/s de velocidad máxima, lo cual nos ha indicado que el desarenador en temporadas de lluvia la remoción de arenas se debe realizar dos veces al mes, debido a que la velocidad longitudinal de un desarenador horizontal debe estar en un rango de 0,25 m/s – 0,30 m/s como lo establece (O.S.090) y solo a este rango se mantiene hasta segunda semana del mes.

6.4.3. Comportamiento de la velocidad de sedimentación de las arenas

Es la velocidad con la que se depositan las arenas de diferentes diámetros en el fondo del desarenador, las muestras de arenas residuales se tomaron del fondo acumulado del desarenador y del lecho de secado de la PTAR. Haciendo el estudio de la granulometría de las arenas se ha llegado a tener como máximo 0,1 cm y 0,0071 cm como mínimo de diámetro de las arenas. En

la figura 61 nos indica que los valores de la velocidad de sedimentación fluctúan en el rango de 0,0044 a 0,1386 m/s. Ojo en la figura los valores dentro del paréntesis se encuentra los ejes (x; y).

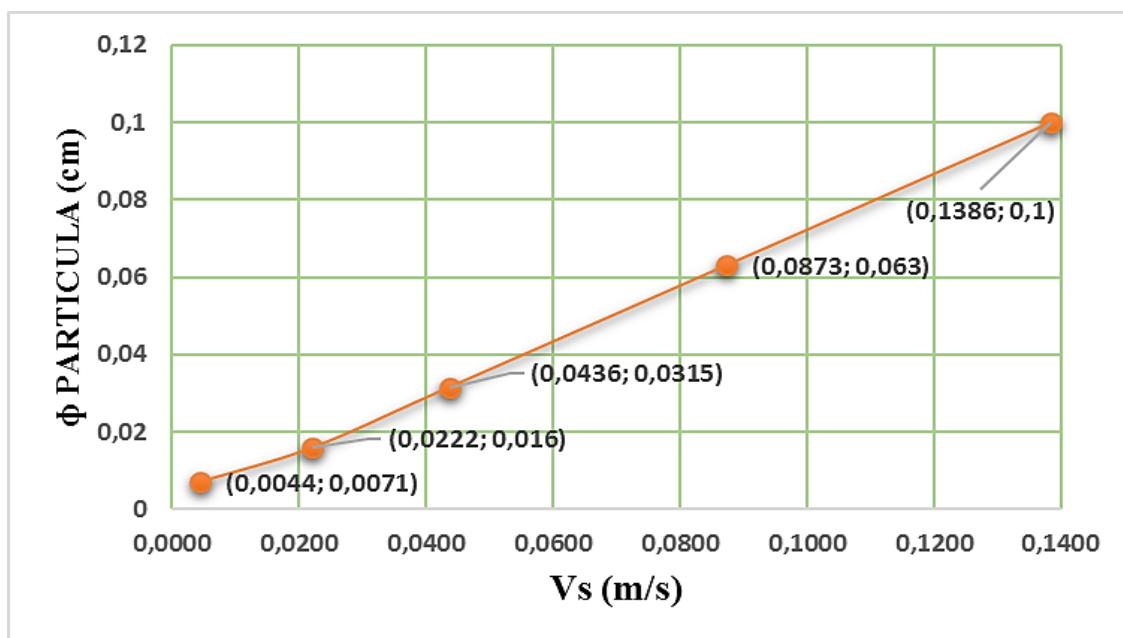


Figura 61. Comportamiento de la velocidad de sedimentación de arenas residuales

En la figura 61 podemos observar que la velocidad de sedimentación de la arena más rápida es de 0,1386 m/s debido al diámetro mayor que presenta esta arena que es 0,1 cm, mientras la velocidad de sedimentación más lenta 0,0044 m/s la que presenta la arena de menor diámetro, debido que este último es de régimen laminar y las velocidades desde (0,0222 a 0,1386) m/s son de régimen transición. Esto nos indica que la velocidad de sedimentación de las arenas es directamente proporcional al diámetro.

6.4.4. Comportamiento del tiempo de retención de las arenas residuales

En la figura 62 se aprecia el tiempo que demora las arenas en depositarse en el fondo del desarenador, de igual manera se trabaja con las muestras de arenas del desarenador con la granulometría ya establecida. Los valores del tiempo de retención de arenas fluctúan en un rango de 4,2733 a 134,0496 segundos desde arenas de mayor a menor diámetro.

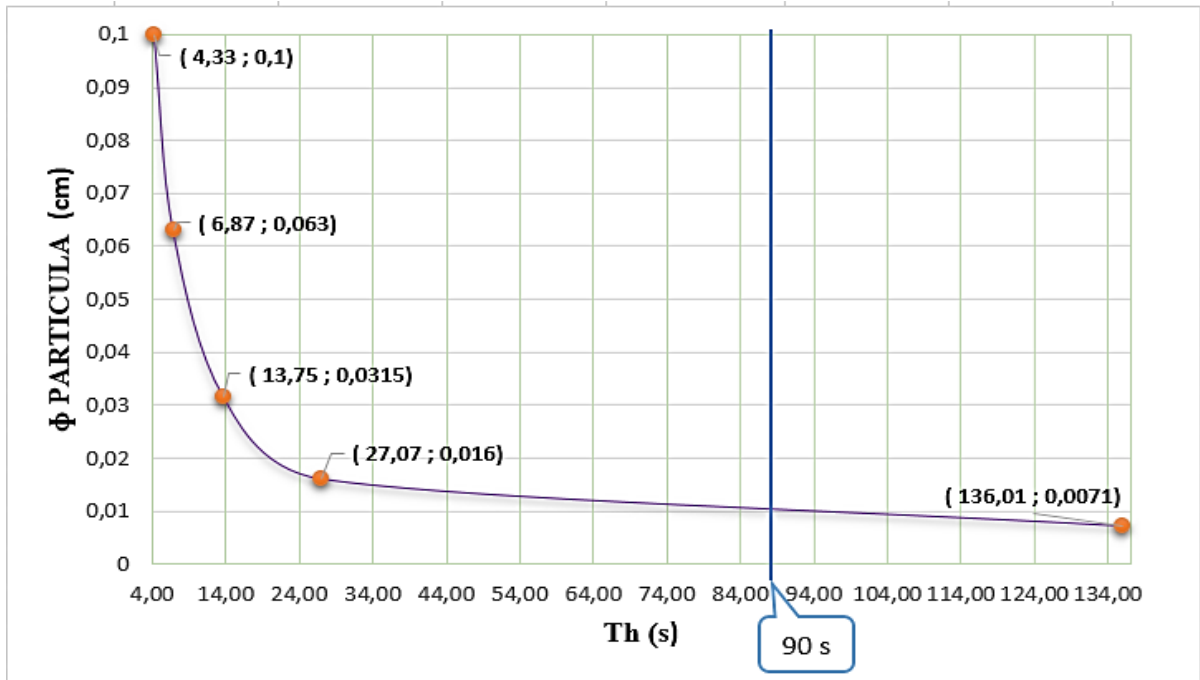


Figura 62. Comportamiento del tiempo de retención de las arenas residuales

El tiempo de sedimentación más rápida presenta la arena de mayor diámetro de 0,1 cm, que sedimenta en 4,33 segundos y el menor tiempo en sedimentar presenta la arena de 0,016 cm de diámetro que sedimenta en 27,07 segundos. En la figura 62 se muestra una separación del último valor que es 136,01 segundos con el resto de los valores, Este tiempo de sedimentación de diámetro 0,0071 cm no deberían sedimentar en el desarenador, debido a que el flujo del agua residual en los 30 m de distancia de recorrido demora 90 s como lo establece (O.S.090). Por tal motivo este último pasara a la siguiente unidad de tratamiento de la PTAR.

De otro modo sedimentará solo en las primeras semanas una vez retiradas las arenas del desarenador debido a que el agua demora más de 100 segundos en el desarenador por la presencia de mayor área de flujo. Además, las arenas de este último diámetro no vienen por separado más si aglomerados con las arenas de mayor diámetro portal sentido llegan sedimentar en el desarenador.

6.4.5. Comportamiento de sólidos totales y arenas acumulados

Saber la cantidad de sólidos acumulados en el desarenador es de mucha importancia, proporciona información de la cantidad que se depositan en los dos horizontales del desarenador tanto sólidos como arenas, etc.

Para determinar esta acumulación se ha trabajado de dos maneras una con la técnica de sedimentación con los conos Imhoff y la otra con la técnica de determinación de sólidos totales.

➤ Determinación en volumen de sólidos y arenas con la ayuda de conos Imhoff.

La determinación en volumen de los sólidos nos brinda resultados correctos, debido que en el cono Imhoff las partículas de mayores diámetros que no son arenas llegan a depositarse en la base, cuando debería ser lo contrario, estas partículas mayores dejan vacíos en esa área, las arenas se depositan por encima de estas partículas y así midiendo el volumen no exacto. Además, la medida en volumen no se da exacto porque la separación en el cono Imhoff ya sea de sólidos totales, arenas, arcillas, etc. No se aprecia claro, las medidas se hicieron en la separación una de otra en transición. Obteniendo 5,5 mL de arena en 1L de muestra, resultados demasiado alto para calcular la acumulación en el desarenador, por ende, no se ha aplicado esta técnica.

➤ Determinación con técnica de sólidos totales

En esta técnica la muestra se ha sometido en un horno a 105 °C, donde el agua se ha volatilizado quedando los sólidos totales y se ha determinado la concentración de sólidos en la muestra.

a) Sólidos totales acumulados en el desarenador

En la figura 63 se muestra la acumulación de sólidos totales en diferentes tiempos donde los valores fluctúan de 14,9386 a 62,0784 toneladas. Las concentraciones de sólidos totales son tomadas en dos puntos en la entrada y salida del desarenador para tener como acumulación en el desarenador (figura 41).

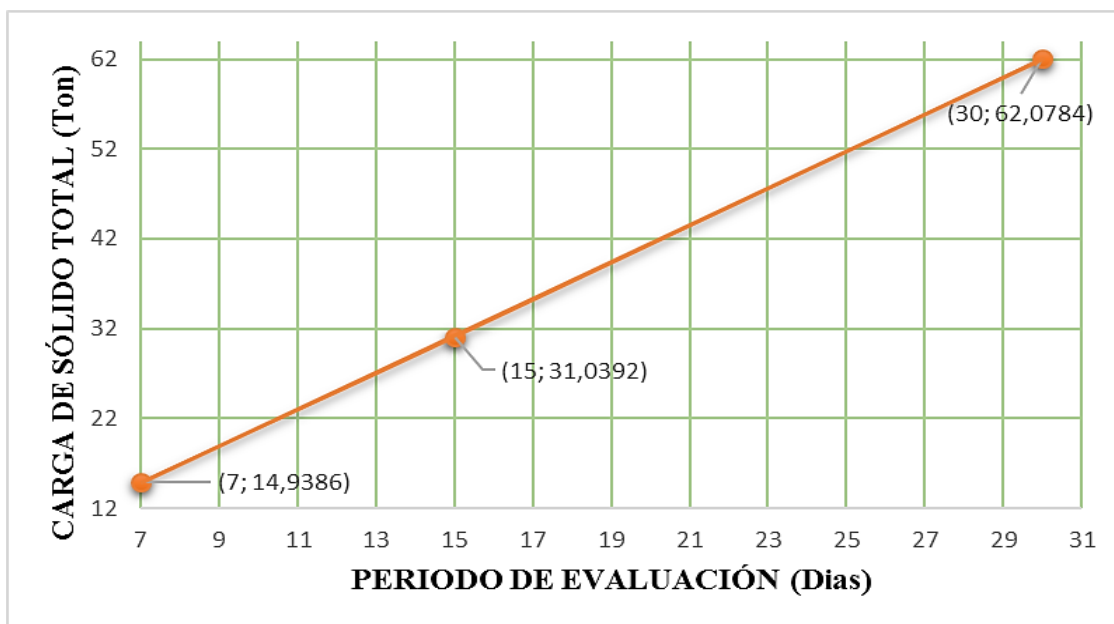


Figura 63. Comportamiento de solidos totales acumulados en el desarenador

La acumulación de sólidos totales como se puede apreciar en la figura 63 que en una semana se acumula 14,9386 toneladas y durante un mes llegándose acumular 62,0784 toneladas de sólidos, son retirados de los dos canales de desarenador. La PTAR “La Totorá” reporta con rango de 50 a 60 metro cúbicos de sólidos totales retiradas en un mes de operación de los dos horizontales del desarenador como se ve en el Anexo 4.

La conversión en toneladas simplemente es multiplicar con la densidad aparente de las arenas residuales que es 1180 kg/m^3 , lo cual indica que la determinación de sólidos está dentro del rango de la cantidad retirada de la PTAR.

b) Arena pura acumulado en el desarenador

Las concentraciones de sólidos totales muestreadas en el ingreso y salida del desarenador también sirvieron para determinar la concentración de la arena pura, pero en este caso la muestra después de haberse sometido a 105°C en un horno para determinar sólidos totales una vez volatilizado el agua, se llevó a una mufla a 550°C durante 20 minutos a esa temperatura quedando solo arena pura, donde se ha volatilizado todas las partículas sólidas orgánicas.

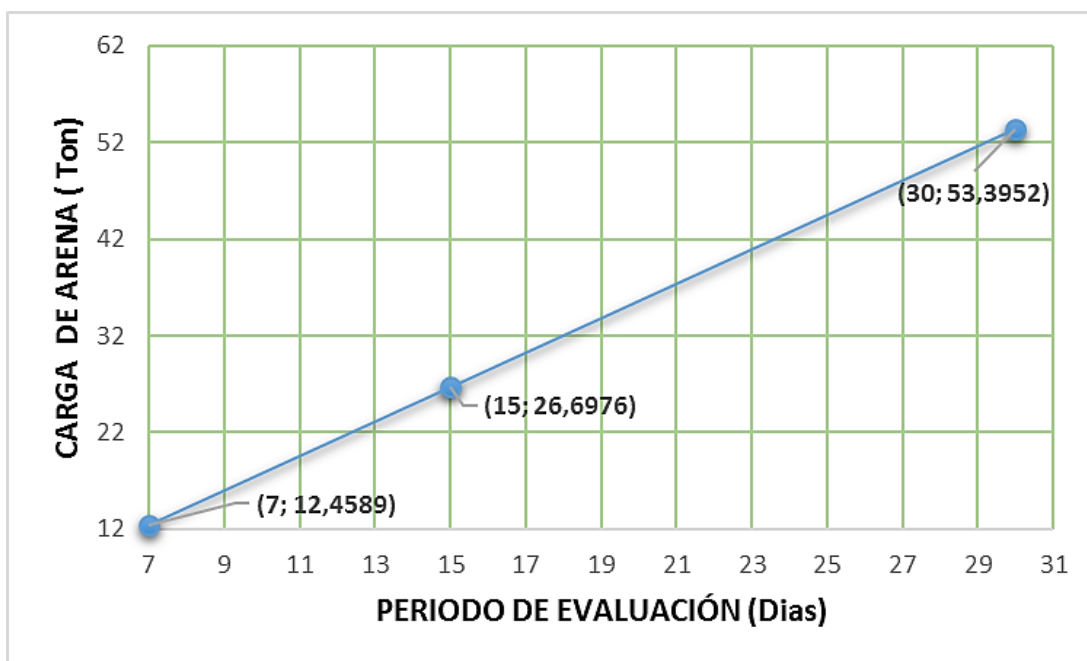


Figura 64. Comportamiento de las arenas acumuladas en función al tiempo

En la figura 64 se aprecia que en una semana de operación de los dos horizontales del desarenador se llegan a retirar 12,4589 toneladas y en un mes de operación llegándose a retirar 53,3952 toneladas. Esto nos indica que 86,01 % del sólido total es arena pura en el desarenador.

6.5. PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL HIDROCICLÓN

Los parámetros fundamentales para el funcionamiento del hidrociclón fueron obtenidos durante el tiempo de evaluación estos son: Caudal de alimentación y presión de ingreso respetando el rango de velocidad de ingreso del fluido para el buen funcionamiento del hidrociclón, que a futuro podrán servir para llevar a nivel planta más adelante.

6.5.1. Remoción de sólidos con hidrociclón

La remoción tiene como finalidad concentrar la cantidad de sólidos en la descarga inferior y la menor en el rebose, aunque en algunos casos se genera una clasificación de separar partículas por tamaños, densidad de las partículas y otros factores que generan esta separación. Pero en este trabajo de investigación la granulometría realizada nos ha brindado datos para la evaluación, ahora lo que da más importancia es la cantidad de sólidos en la descarga inferior especialmente de la arena y casi nada de arena en la salida del hidrociclón (rebose).

Teniendo en cuenta las variables a modificar en la evaluación se procedió a comenzar con el bombeo para calibrar con la válvula el caudal de ingreso, el flujo máximo que ha proporcionado la electrobomba de alimentación al hidrociclón fue 9,1660 L/s.

6.5.2. Caudal y tiempo de retención hidráulico

La operación del sistema se ha iniciado con caudal de arranque de 8,2721 L/s, para un tiempo de residencia hidráulico de 1,36 segundos durante una hora de operación del equipo para tener capacidad de remoción de arenas residuales. Una vez alcanzada la estabilidad bajo las condiciones iniciales, se ha ido incrementando y bajando el caudal progresivamente, mediante la técnica del aforo, hasta alcanzar los 9,1660 L/s para un tiempo de residencia hidráulico de 1,25 segundos en una hora de operación y bajar hasta 6,4426 L/s en 1,48 segundos. En la figura 65, se puede apreciar la variación del caudal durante la evaluación del sistema, a medida que el sistema alcance la máxima remoción.

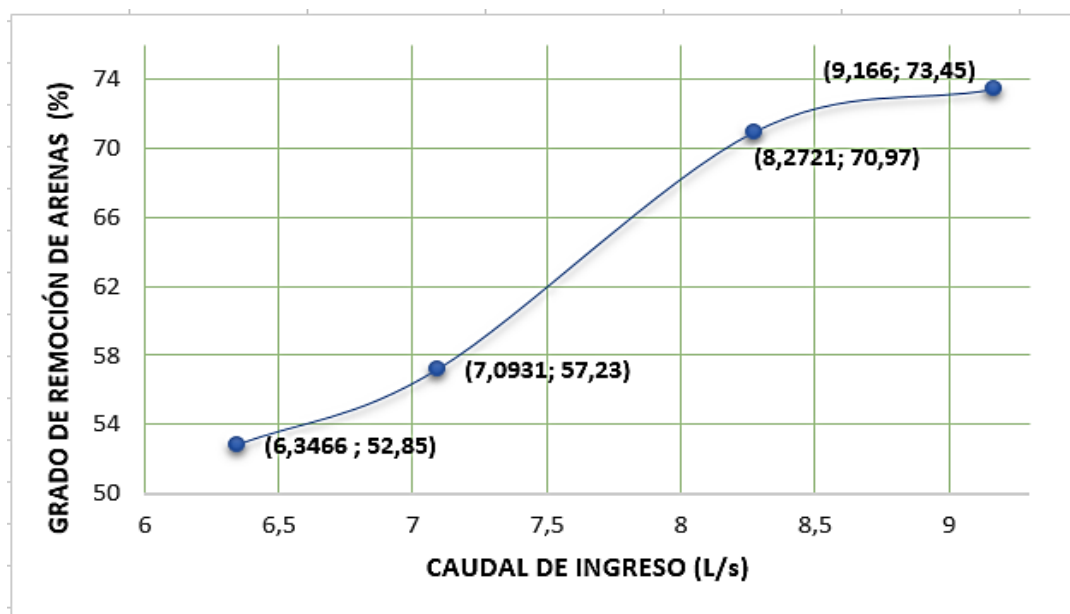


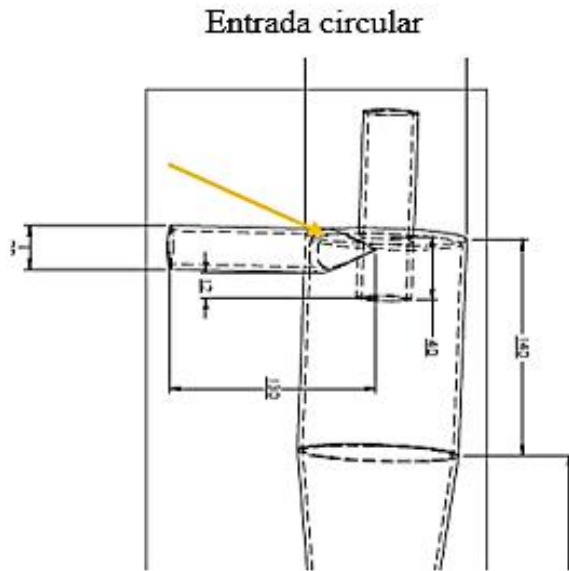
Figura 65. Comportamiento de la eficiencia del hidrociclón

La eficiencia de remoción de las arenas residuales en relación al caudal de alimentación ha alcanzado un máximo de 73,45 % y mínimo 52,85 %, mejorando así el caudal de diseño que solo ha llegado a 70,97 % de eficiencia. Esto debido que a mayor caudal de alimentación

aumenta la velocidad de ingreso, estando en el rango de velocidad establecido para el funcionamiento del hidrociclón, pero si se alimenta por encima de 11 L/s la estructura del hidrociclón no llegara a soportar demasiado caudal llegando a colapsar y pasar el límite del rango de velocidad y dando como resultado una demasiada disminución de la eficiencia.

El trabajo de tesis realizado por Doroteo, E., reporta una eficiencia de 78% en función a la remoción de sólidos de lavado de suelos, con caudal de ingreso 2,5 L/s, con 20 % de sólidos en alimentación y 4,5 kg/min en salida inferior (colector) en la cual se acumula 270 kg en una hora, en cambio en la investigación se ha logrado una eficiencia de 90 % (considerando sólido total: arena + lodo orgánico) con caudal de 9,1660 L/s, concentración de sólido en alimentación $5,0250 \times 10^{-4}$ kg/L y un flujo másico en la descarga de $4,1543 \times 10^{-3}$ kg/s en la cual se acumula 14,9555 kg en una hora, si se considerara solo arena la eficiencia reportada es 73,45 %. Doroteo E., utiliza alto contenido de sólidos en alimentación al hidrociclón, debido que su bomba de alimentación es de rodete abierto, especialmente utilizado en la industria de minerales (pulpa), mientras en este trabajo realizado la electrobomba sumergible utilizada para la alimentación del hidrociclón solo proporciona un máximo de 5% de sólidos en la alimentación, especialmente para flujo de agua con poca cantidad de sólidos en suspensión.

A pesar de que son investigaciones casi parecidos en el trabajo realizado se reporta una eficiencia mayor comparado al de Doroteo, al evaluar su trabajo de construcción del hidrociclón se observa que las ecuaciones usadas para dimensionamiento están referidos para minerales (Rietema) y que tienen un comportamiento diferente ya que se toma un valor de diámetro de corte del 50% (d_{50c}) más utilizada en la flotación de minerales, por tal motivo reporta una eficiencia baja, porque no todo los sólidos quedan separadas en la parte inferior (descarga) del hidrociclón, en cambio en este diseño que se ha realizado se tomó ecuaciones de un ciclón de alta eficiencia reportado por STAIRMAND que da una transformación de un diámetro circular a una entrada rectangular al hidrociclón, especialmente para sólidos de menor tamaño.



Doroteo, E.



Tesis actual

6.5.3. Comportamiento de turbiedad

La turbiedad se ha tomado en un segundo plano, porque que hubo la necesidad de tomarlo en cuenta debido a que presenta a simple vista un cambio en la turbiedad a la salida superior del hidrociclón (rebose) en comparación a la entrada del hidrociclón. La toma de muestra se ha realizado a la entrada y salida como ya se ha mencionado. En la figura 66 indica que los valores de turbiedad de ingreso o captación fluctúan en el rango 354 a 369 NTU y a la salida del hidrociclón (rebose) fluctúan en el rango de 248 a 198 NTU, lo que indica que hay buena remoción de la turbiedad.

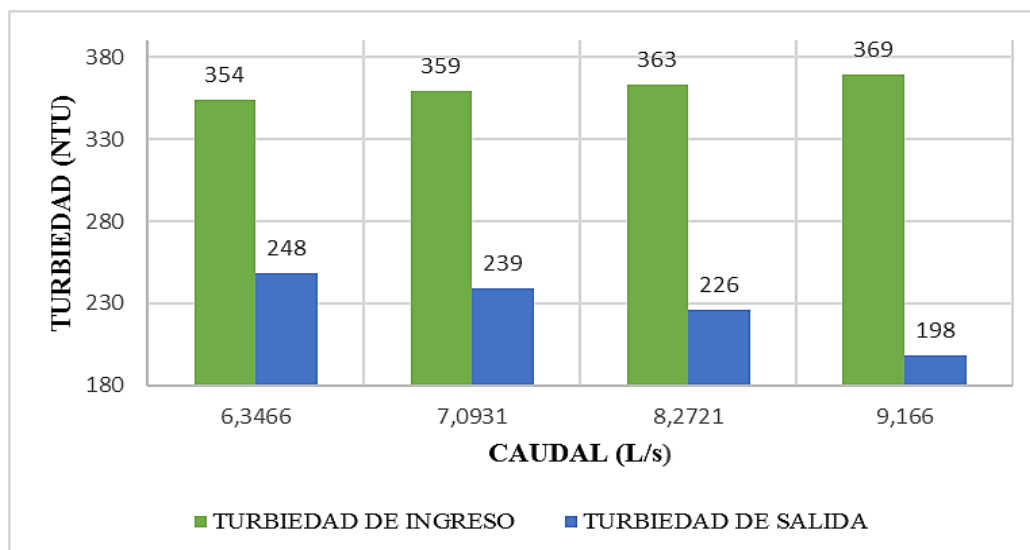


Figura 66. Comportamiento de la turbiedad

En la figura 66, se observa que a medida que el caudal aumenta, disminuye la turbiedad a la salida del hidrociclón (rebose), se observa que con caudal de alimentación de 9,166 L/s se ha obtenido una turbiedad de 198 NTU en la salida superior del hidrociclón, siendo muy buena alternativa para la disminución de la turbiedad del desarenador, ya que la turbiedad con la que desemboca el efluente de la PTAR al río alameda es un promedio de 86 NTU. En comparación con la turbiedad de la salida del hidrociclón este podría bajar a menos de 86 NTU en el efluente de la PTAR.



Figura 67. Calidad de agua residual a la salida OVERFLOW del hidrociclón.

En la figura 67 se puede apreciar la calidad del agua residual a la salida superior del hidrociclón.

CONCLUSIONES

1. Se ha diseñado y construido el hidrociclón para la remoción de arenas residuales a escala piloto, durante dos semanas, con las siguientes especificaciones:

Forma del hidrociclón	: parte cilíndrica y cónica
Tipo de material	: Hierro galvanizado 1,20 mm de espesor
Altura del hidrociclón	: 56 cm
Diámetro del hidrociclón (parte cilíndrica)	: 14 cm
Volumen del hidrociclón (parte cilíndrica)	: 3,2330 L
Volumen del hidrociclón (parte cónica)	: 2,6660 L

2. Se ha evaluado los parámetros de operación del canal del desarenador con las dimensiones siguientes: Longitud de canal: 30 m, ancho del canal: 1,20 m, altura del canal: 2,50 m, altura de trabajo de operación del canal: 1,15 m, caudal máximo: $0,650 \text{ m}^3/\text{s}$, concentración de ingreso de arena: $0,12166 \text{ kg/m}^3$, concentración de salida de arena: $0,07746 \text{ kg/m}^3$, velocidad longitudinal óptimo: $0,3104 \text{ m/s}$, velocidad de sedimentación óptimo: $0,0222 \text{ m/s}$, tiempo de retención de arenas óptimo: 27,0651 s y acumulación de sólidos totales en un mes 62,0784 toneladas. Los datos de concentración corroboran que el canal horizontal de desarenado no está cumpliendo su función de retener el mayor porcentaje de arena.
3. El contenido de materia orgánica fue 10,7% que es parte de la arena. Gravedad específica: 2,6208, densidad aparente : $11\ 836 \text{ kg/m}^3$, humedad :82.87%.
4. De acuerdo a los resultados experimentales el hidrociclón ha experimentado una buena eficiencia, ya que se ha alcanzado una remoción máxima en función a la arena de 73,45%, bajo condiciones de una hora de operación, mientras en la literatura los ciclones de alta eficiencia alcanzan un 90% de remoción con partículas de menores tamaños. En base a la evaluación de las variables de proceso también se ha determinado los parámetros de operación para el hidrociclón a nivel piloto en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” de la ciudad de Ayacucho: Tiempo de retención hidráulico: 1,25 s, caudal de

operación: 9,1660 L/s, presión de ingreso: 9 psi. También se ha observado que hay una tendencia a disminuir la eficiencia del hidrociclón cuando aumenta el caudal de ingreso por encima de 11 L/s debido a que el hidrociclón está diseñado para 8 L/s una vez sobrepasada este valor colapsaría, ya no estaría en el rango de velocidad establecida para el funcionamiento correcto del hidrociclón,

5. Se ha presupuestado el costo del equipo del hidrociclón, incluido los materiales de construcción y mano de obra como se aprecia en el anexo 11 en la tabla 11.4, con un costo de 1 800 soles para una capacidad de 8 L/s de caudal.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda la instalación del hidrociclón de acuerdo al caudal y características físicas del flujo de alimentación de aguas residuales con contenidos de arena en la planta de tratamiento de aguas residuales “La Totorá” de la ciudad de Ayacucho, a fin de obtener mayor capacidad de remoción de arenas residuales.
2. Durante la operación del hidrociclón si se observa que la aguja del manómetro de hidrociclón fluctúa muy rápido cabe la posibilidad que el conducto del Underflow está tapado por sedimentación de arena, esto puede provocar que todo el flujo sea dirigido directamente al Overflow.
3. Se recomienda seguir investigando acerca del funcionamiento de los hidrociclones con efluentes de aguas residuales con arenas en suspensión, instalados en serie y paralelo con la finalidad de establecer los modelos matemáticos que puedan facilitar el diseño y la implementación en otras unidades.
4. Se recomienda el uso de electrobombas sumergibles con rodete de acero inoxidable para el succionamiento de las aguas residuales con arenas en suspensión.
5. Verificar y controlar los parámetros de ingreso y salida del hidrociclón a fin de obtener una buena eficiencia en la separación de arenas residuales.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS E INFORMES

- Argandoña, L., & Macias, R. (2013). *Determinación de sólidos totales, suspendidos, sedimentados y volátiles, en el efluente de las lagunas de oxidación situadas en la Parroquia Colón, Cantón Portoviejo, Provincia de Manabí, durante el periodo de Marzo a Septiembre 2013*. Manabí, Ecuador: Tesis, Universidad Técnica de Manabí.
- Arismendy, J. (2013). *Evaluación del proceso de clasificación de sólidos en un hidrociclón industrial*. Medellín, Colombia: Tesis, Universidad Pontificia Bolivariana.
- Barboza, G. (2013). *Reducción de la carga de contaminantes de las aguas residuales de la planta de tratamiento de Totorá-Ayacchuco empleando la técnica de electrocoagulación*. Lima, Perú: Tesis, Universidad Nacional de Ingeniería.
- Barrera, S., Urrutia, C., & Tolvet, C. (2010). *Parámetros de diseño de un hidrociclón*. Santiago de Chile: Trabajo de investigación, Universidad de Chile.
- Cadahía, C. (2005). *Aplicaciones de hidrociclones en fertirrigación*. Madrid, España: Tercera edición.
- Doroteo, E. (2010). *Diseño y operación de un hidrociclón para mejorar la técnica de lavado de suelos*. Coyoacán, México.: Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Kelly, E., & Spottiswood, D. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. Noriega-Limusa, Mexico.
- Lapeña, M. (1990). *Tratamientos de aguas residuales*. Barcelona, España: Editorial Boixareu.
- López, S., & Martín, S. (2015). *Depuración de aguas residuales*. Madrid, España: Editorial Elearning S.L, Edición 5.1.
- Matta, R. (2014). *Determinación de gravedad específica de los sólidos*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.
- Medina, J., & Miranda, G. (2007). *Diseño previo a la obtención de filtración de agua de formación de pozos petroleros*. Quito, Ecuador: Universidad Politécnica Nacional.
- Metcalf, & Eddy. (1996). *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento y reutilización*. Mexico: McGraw Hill.

- Oloya, R. (2015). *Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos*. Trujillo.: Universidad Privada Antenor Orrego.
- Paredes, D. F. (2018). *Diseño de un hidrocilón para clasificación de partículas sólidas de lechado de cal en planta concentradora*. Arequipa: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Ramallo, R. (1996). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canadá: Editorial Reverté.
- Rietema, K., & Verver, C. (1961). *Cyclones in Industry*. New York, EE.UU: Elsevier Publishing Company.
- Sainz, J. (2005). *Procesos y operaciones unitarias en depuraciones de aguas residuales*. Madrid, España: 1º Edición.
- Segura, J. (2009). *Problemas de procesamiento de minerales*. Trujillo , Perú: 3º Edición.
- Solís, L., & Jerónimo, L. (2003). *Principios basicos de la contaminacion ambiental*. Toluca, México: 1º Edición.
- Svarovsky, L. (1984). *Hydrocyclones*. Londres: Rinehart and Winston Ltd.
- Torres, J., & Briceño, Y. (2016). *Tratamiento de aguas residuales de tipo domestico a partir de coleópteros scarabaeidae*. Boyacá, Colombia: Tesis, Universidad Nacional Abierta y a Distancia.

REVISTAS Y ARTICULOS

- Echeverri, C. (2006). Diseño óptimo de ciclones. *Ingenierias Universidad de Medellín*, 123-139.
- Renner V. & Cohen H. (1978). *Measurement and Interpretation of size distribution of particles within a hydrocyclone*. Trans.Inst Chem . Eng.
- Ruiz, B. (2010). *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento : Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales*. Coyoacán, Mexico: Director General de la Comisión Nacional del Agua.
- Trapode, A. (2016). *Depuracion y regeneracion de aguas residuales urbanas*. Madrid,España: Editorial "PUBLICACIONES UNIVERSITAT D´ALACANT".

PÁGINA WEB

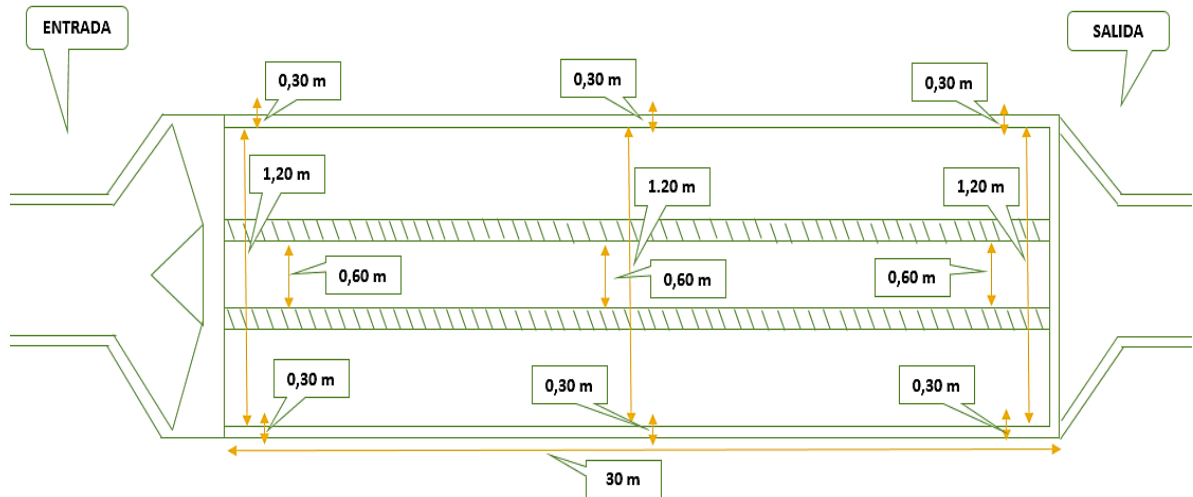
- OPS/CEPIS. (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores UNATSABAR*. Obtenido de <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/agua/158esp-diseno-desare.pdf>

- OS.090. (2009). *Plantas de tratamiento de aguas residuales DS N° 022*. Obtenido de https://www.saludarequipa.gob.pe/desa/archivos/Normas_Legales/saneamiento/OS.090.pdf
- SEDA. (31 de Diciembre de 2015). *Proyecto de ampliación y mejoramiento de la PTAR Ayacucho*. Obtenido de <http://www.sedaayacucho.pe/archivos/196-localidad-de-huamanga.pdf>
- SEDALORETO. (15 de Enero de 2015). *Manual de operación-procedimientos-PTAP NUEVA*. Obtenido de <http://www.sedaloreto.com.pe/transparencia/planeaorganizacion/manuales/3.MaPro-PTAPNueva-Iqts.pdf>

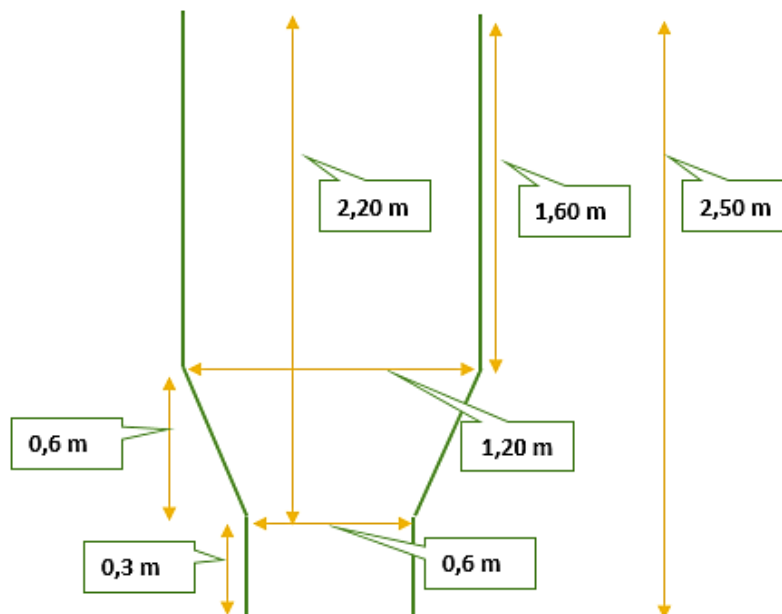
ANEXOS

Anexo 01. Dimensiones del desarenador de la PTAR “La Totorá”

1.1 Dimensiones del desarenador (vista superior)



1.2 Dimensiones del desarenador (vista interna)



Anexo 02. Cálculos para el diseño del hidrociclón con 80 % de malla en el OVERFLOW

Cálculo de d50c

Mediante este método podremos calcular el d50c que necesitaremos para poder realizar las tabulaciones posteriores.

Usaremos la tabla 2.1 referente al método empírico de Krebs.

El porcentaje de malla 200 (75µm) requerido para el Overflow del hidrociclón de 80%, será usada para calcular factor necesario para hallar el d50c.

Tabla 2.1

Factor para cálculo de d50c

% de pasantes en Overflow	Factor
80,0	1,25

Fuente: Segura J., (2009).

Para calcular el Fuente d50c usaremos la siguiente ecuación (32)

$$d50c = Factor * abertura de malla \quad \dots 32$$

Donde:

Factor = 1,25

Abertura de malla = 75 µm

$$d50c = 1,25 * 75 \mu m$$

$$d50c = 93,75 \mu m$$

Cálculo de porcentaje de sólidos en volumen y peso (Inlet)

Para realizar los cálculos haremos uso de la siguiente formula: Ecuación 6 y 7 respectivamente del capítulo II:

$$\%v/v_{inlet} = 50 - \frac{40}{\left[\frac{X_{95}}{16,098 * \left[\frac{1,65}{(G.E - 1)} \right]^{0,485} * \left[\frac{10}{P} \right]^{0,252} * D_c^{0,467}} \right]^{0,5584}}$$

$$\%W/W_{inlet} \frac{100 * G.E * (\%V/V_{inlet})}{[(100 + (\%V/V_{inlet}) + (G.E - 1))]}$$

Donde:

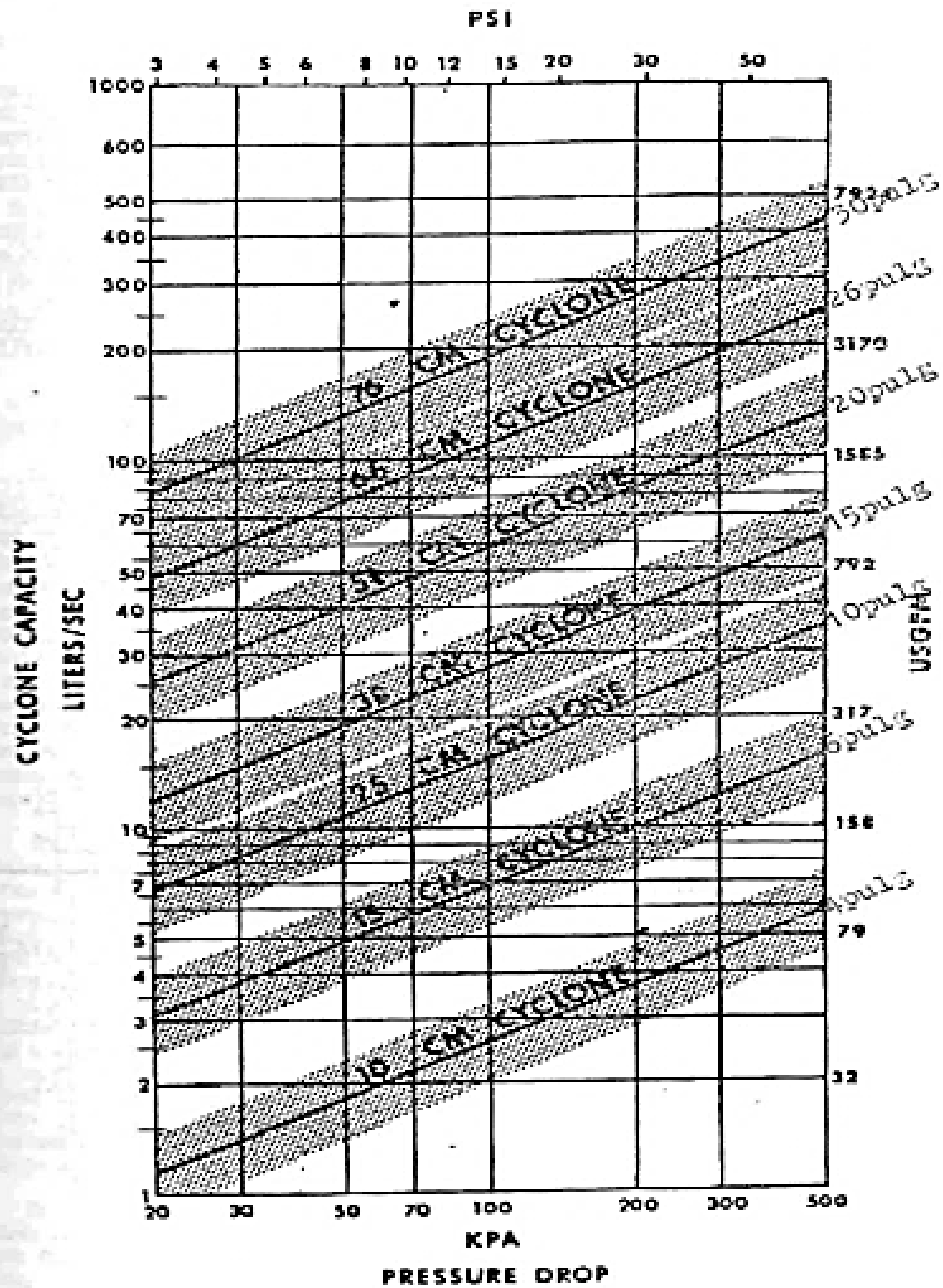
G.E. = 2,62

X95 = 100 µm

P = Presión de ingreso (parámetros a tabular)

Dc = Diámetro del ciclón (parámetros a tabular)

Como vemos para encontrar este valor va ser necesario Dc (Diámetro de hidrociclón) y presión de ingreso. Por tal razón deberemos tabular los valores según el siguiente diagrama.



Fuente: Segura J., (2009)

Tabla 2.2*Tabulación de d50c Corregido*

Diámetro de hidrociclón (pulg)	Presión ingreso (psi)	Caudal (L/s)	% V/V (Inlet)	% W/W (Inlet)
6	8	5.1	31.0613	62.0237
6	10	5.9	31.6468	62.9152
6	12	6.5	32.1116	63.6175
6	15	7.0	32.6646	64.4466
6	20	8.0	33.3524	65.4683
6	30	10.2	34.2756	66.8236
6	50	13.0	35.3662	68.4010
10	8	12.0	28.3628	57.8170
10	10	13.0	29.0316	58.8712
10	12	14.0	29.5627	59.7055
10	15	15.0	30.1945	60.6892
10	20	18.0	30.9802	61.8996
10	30	23.0	32.0351	63.5022
10	50	29.0	33.2811	65.3629
15	8	20.0	25.9496	53.8924
15	10	22.0	26.6931	55.1153
15	12	25.0	27.2834	56.0763
15	15	28.0	27.9857	57.2080
15	20	33.0	28.8590	58.5986
15	30	40.0	30.0315	60.4363
15	50	55.0	31.4165	62.5655

Cálculo de d50c corregido

Para calcular el d50c corregido lo realizaremos por medio de método de Plitt utilizaremos la ecuación (5) y lo compararemos d50c previamente calculado.

$$d50c = \frac{k * (D)^{0,46} * (Di)^{0,6} * (Do)^{1,21} * e^{0,063 * \%v/vinlet}}{(Du)^{0,71} * (Hc)^{0,38} * Q^{0,45} * (G.E - 1)^{0,5}}$$

En la tabla obtendremos los siguientes valores utilizando la ecuación (5) y buscaremos el d50c semejante al $d50c = 93,75 \mu m$ calculado.

Tabla 2.3

Tabulación de d50c corregido

Diámetro de hidrociclón (pulg)	Presión ingreso (psi)	% V/V(Inlet)	Caudal (L/s)	Caudal (pie³/min)	d50c (μm)
6	8	31.0613	5.1	10.8018	62.0237
6	10	31.6468	5.9	12.4962	62.9152
6	12	32.1116	6.5	13.7670	63.6175
6	15	32.6646	7.0	14.8260	64.4466
6	20	33.3524	8.0	16.9440	102.0505
6	30	34.2756	10.2	21.6036	96.8501
6	50	35.3662	13.0	27.5340	93.0520
10	8	28.3628	12.0	25.4160	113.3905
10	10	29.0316	13.0	27.5340	114.1425
10	12	29.5627	14.0	29.6520	114.1201
10	15	30.1945	15.0	31.7700	115.0979
10	20	30.9802	18.0	38.1240	111.4125
10	30	32.0351	23.0	48.7140	106.5796
10	50	33.2811	29.0	61.4220	103.9391
15	8	25.9496	20.0	42.3600	124.6886
15	10	26.6931	22.0	46.5960	125.2869
15	12	27.2834	25.0	52.9500	122.9087
15	15	27.9857	28.0	59.3040	122.0307
15	20	28.8590	33.0	69.8940	119.7487
15	30	30.0315	40.0	84.7200	118.1974
15	50	31.4165	55.0	116.4900	111.8399

De la tabla anterior podemos observar que d50c más cercano del parámetro planteado es de 93,0520 μm. Por tal razón tomaremos los siguientes parámetros para el dimensionamiento de nuestro hidrociclón expuesto a continuación:

- Diámetro de hidrociclón = 6 Pulg
- Caudal de ingreso = 13 L/s

- Presión de ingreso a hidrociclón = 50 psi
- Porcentaje de sólidos (volumen) = 35.3662 %
- Porcentaje de sólidos (peso) = 68.4010 %

Dimensiones del hidrociclón

Ya conocido el diámetro del hidrociclón podemos dimensionar el hidrociclón para la remoción de las arenas residuales:

Tabla 2.4

Dimensiones del hidrociclón

Descripción	Símbolo	Medida (Pulg)	Medida calculada (cm)	Medida asumida (cm)
Diámetro de ciclón	Dc	6.0000	15.24	15.5
Altura de entrada inlet	a	1.8798	4.7747	5.0
Ancho de entrada inlet	b	0.9402	2.3881	3.0
Diámetro de Underflow	Du	0.7200	1.8288	2.0
Diámetro de Overflow	Do	1.2000	3.048	3.0
Altura de vortex	S	3.7518	9.5296	10
Altura cilindro	B	9.0000	22.86	23
Altura de cono	Hc	15.000	38.1	38
Ángulo de cono = 12° θ - - -				

Anexo 03. Características de la electrobomba sumergible Pedrollo

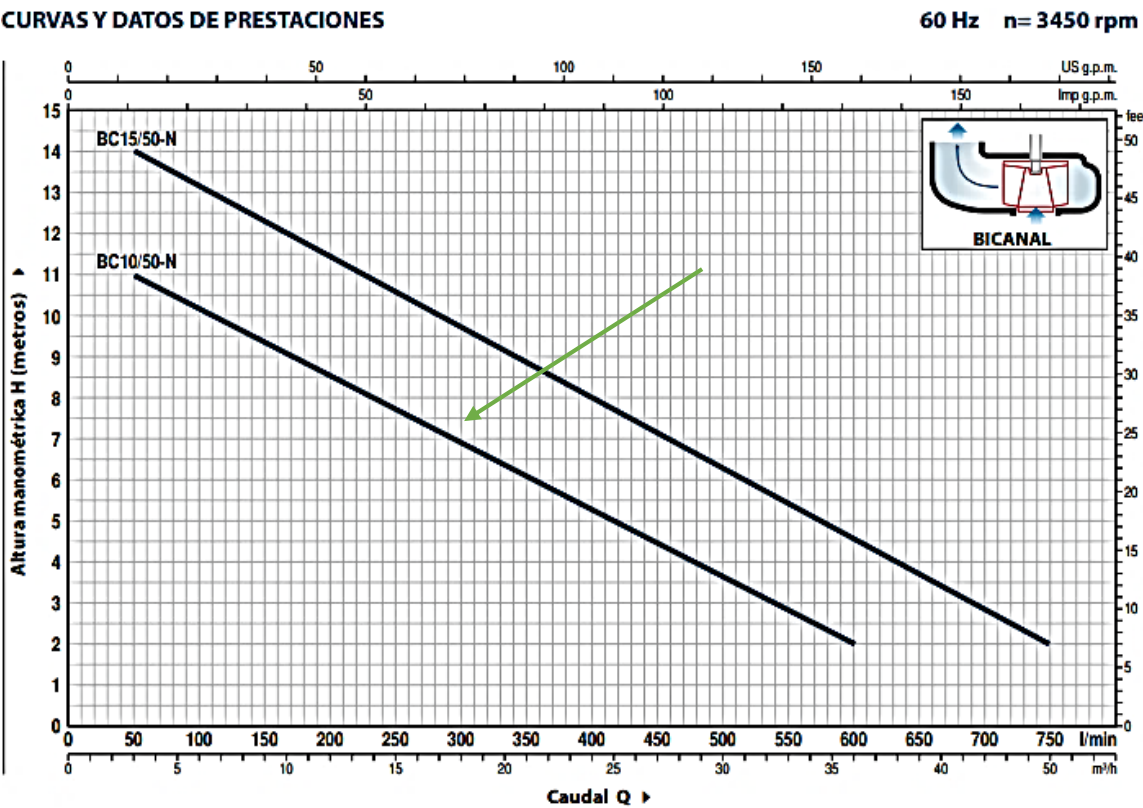


Figura 3. 1 Curvas de selección de caudal

Tabla 3. 1 Selección de caudal a diferentes distancias.

MODELO		POTENCIA (P ₂)		Q	0	3	6	12	18	24	30	36	42	45
Monofásica	Trifásica	kW	HP		0	50	100	200	300	400	500	600	700	750
BCm 10/50-N	BC 10/50-N	0.75	1	H metros	12	11	10	8.5	7	5	3.5	2		

Potencia teórica de la electrobomba

Para calcular la potencia teórica de la electrobomba se ha utilizado la ecuación (33)

$$P_T = \rho \times g \times Q \times h_b \quad \dots 33$$

Donde:

P_T : Potencia teórica de la electrobomba (Vatios)

ρ : Densidad del fluido (972,1 kg/m³)

g : Aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)

Q : Caudal del fluido ($8 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

h_b : Altura dinámica de la bomba (3,8 m)

$$P(\text{Vatios}) = 972,1 \text{ kg/m}^3 \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \times \left(8 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) \times 3,8 \text{ m}$$

$$P = 289,9036 \text{ Vatios}$$

$$1 \text{ hp} = 745,7 \text{ Vatios}$$

$$P = 289,9036 \text{ Vatios} \times \frac{1 \text{ hp}}{745,7 \text{ Vatios}}$$

$$P = 0,3888 \text{ hp}$$

Potencia real de la electrobomba

$$\eta = \frac{P_T}{P_{\text{real}}} \quad \dots 34$$

P_T : Potencia real de la electrobomba

η : Eficiencia teórica de la electrobomba Pedrollo es 60 %

$$P_{\text{real}} = \frac{0,3888 \text{ hp}}{0,6}$$

$$P_{\text{real}} = 0,648 \text{ hp}$$

Por lo tanto, la potencia real de la electrobomba fue 0,648 hp necesaria para bombear 8 L/s, pero se ha adquirido el de 1 hp poder satisfacer los requerimientos de caudal y distancia necesaria, con la finalidad de encontrar la eficiencia a mayor caudal de 8 L/s.

POS. COMPONENTE CARACTERISTICAS CONSTRUCTIVAS

1	CUERPO BOMBA	Hierro fundido con tratamiento de cataforesis con boca roscada ISO 228/1				
2	BASE	Acero inoxidable AISI 304				
3	RODETE	Tipo BICANAL en acero inoxidable AISI 304				
4	CAJA PORTAMOTOR	Acero inoxidable AISI 304				
5	TAPA MOTOR	Acero inoxidable AISI 304				
6	EJE MOTOR	Acero inoxidable EN 10088-3 - 1.4104				
7	DOBLE SELLO MECANICO EN EL EJE CON CAMARA DE ACEITE INTERCALADA					
	Sello	Eje	Posición	Materiales		
	Modelo	Diámetro		Anillo fijo	Anillo móvil	Elastómero
	MG1-14D SIC	Ø 14 mm	Lado motor	Carburo de silicio	Grafito	NBR
			Lado bomba	Carburo de silicio	Carburo de silicio	NBR
8	RODAMIENTOS	6203 ZZ / 6203 ZZ				

9	CONDENSADOR		
	<i>Electrobomba</i>	<i>Capacidad</i>	
	<i>Monofásica</i>	<i>(220 V)</i>	<i>(110 V a 127 V)</i>
	BCm 10/50-N	20 µF - 450 VL	30 µF - 250 VL
	BCm 15/50-N	25 µF - 450 VL	-

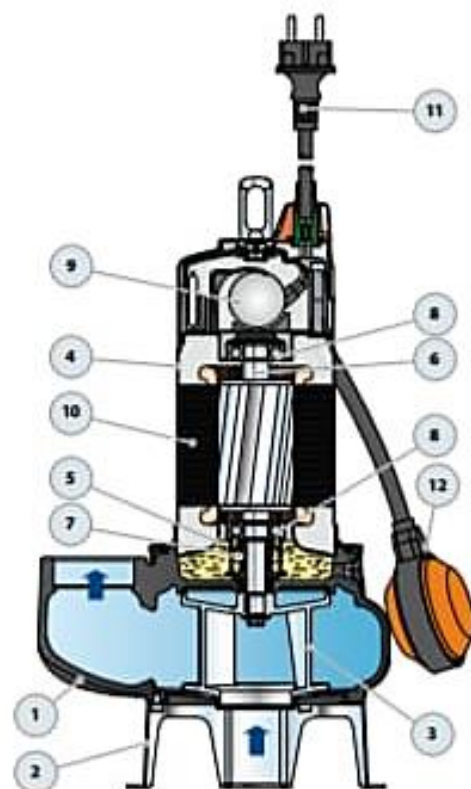
10 MOTOR ELECTRICO

BCm: monofásica 220 V - 60 Hz
con protección térmica incorporada en el bobinado
BC: trifásica 380 V - 60 Hz
- Aislamiento: clase F
- Protección: IP X8

11 CABLE DE ALIMENTACIÓN

De tipo "H07 RN-F"
(con conector Schuko sólo en las versiones monofásicas)
Longitud estándar 5 metros (10 metros para BC15/50)

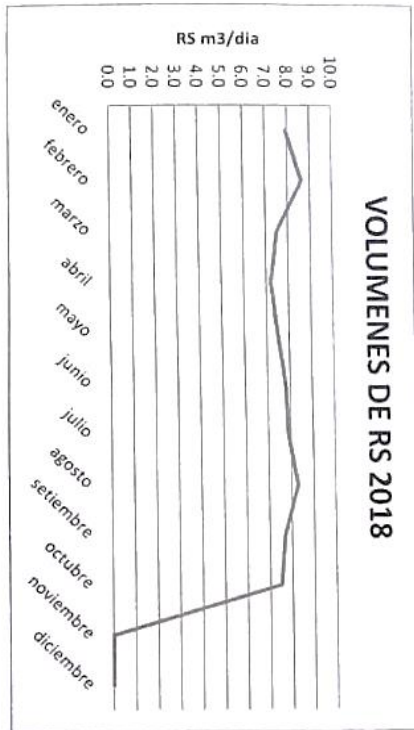
12 INTERRUPTOR CON FLOTADOR EXTERNO (sólo para versiones monofásicas)



Anexo 04. Control de operaciones de residuos sólidos PTAR TOTORA 2018

CONTROL DE OPERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS PTAR TOTORA 2018

PROCESOS/OPERACION	UNIDAD	Ene-18	Feb-18	Mar-18	Abr-18	May-18	Jun-18	Jul-18	Ago-18	Sep-18	Oct-18	Nov-18	Dic-18	Prom.	Total
Cámara de Rejillas Gruesas	m ³	20	20	22	20	24	24	24	26	26	28			23.40	234
Cámara de Rejillas Automáticas	m ³	18	18	20	22	24	26	26	28	24	26			23.20	232
Lecho de grava	m ³	48	44	42	32	34	32	34	36	32	44			37.80	378
Lecho de arena	m ³	60	48	50	50	50	54	60	50	40	40			50.20	502
Desarenador de Flujo H.	m ³	62	52	52	54	54	58	50	60	60	50			55.20	552
Cámara de distribución Imhoff	m ³	38	38	40	42	44	46	48	48	44	46			43.40	434
Imhoff (Material Flotante)	m ³	12	20	6	4	2	2	0	8	2	1			5.70	57
Lecho de Secado	m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0.00	0
AT (Natas)	m ⁴	0	2	1	0	0	0	0	0	2	0			0.50	5
Lagunas facultativas	m ³	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0			0.40	4
Laguna de Maduración N° 1, 2 y 3	m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0.00	0
Laguna de cloración	m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0.00	0
Volumen Diario	[m ³ /dia]	7.9	8.6	7.5	7.2	7.5	7.8	7.9	8.3	7.7	7.5	0.0	0.0	6.50	0
Volumen Mes	[m ³ /mes]	248.0	242.0	233.0	224.0	232.0	242.0	244	256	230	234	0.0	0.0	198.75	2385



**Anexo 05. Control de turbiedad en el mes de Diciembre PTAR TOTORA
2018**

TURBIEDAD DE LA PTAR “LA TOTORA”	
AFLUENTE	EFLUENTE
291	82,6
295	81,4
288	75,0
271	75,2
302	86,0
294	87,3
285	89,0
281	72,0
305	89,0
296	82,0

Anexo 06. Resolución ministerial N° 128-2017-Vivienda

Aprueban condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final

RESOLUCIÓN MINISTERIAL

N° 128-2017-VIVIENDA

Lima, 5 de abril de 2017

VISTO, el Informe técnico - Legal N° 001-2017-VIVIENDA/VMCS-DGAA, complementado con Informe Técnico - Legal N° 002-2017-VIVIENDA/VMCS-DGAA de la Dirección General de Asuntos Ambientales del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y el informe N° 502-2017-VIVIENDA/OGAJ de la Oficina General de Asesoría Jurídica;

CONSIDERANDO:

Que, la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos establece que la gestión y el manejo de los residuos sólidos de origen industrial, agropecuario, agroindustrial, de actividades de la construcción, de servicios de saneamiento o de instalaciones especiales, son normados, evaluados, fiscalizados y sancionados por los ministerios u organismos reguladores o de fiscalización correspondientes, sin perjuicio de las funciones técnico normativa y de vigilancia que ejercen otras instituciones;

Que, mediante Decreto Legislativo N° 1278, se aprobó la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos la cual tiene por objeto establecer derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, con la finalidad de propender hacia la maximización constante de la eficiencia en el uso de los materiales y asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos económica, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción las obligaciones, principios y lineamientos del citado Decreto Legislativo;

Que, la tercera disposición complementaria final del mencionado Decreto Legislativo establece que este entrará en vigencia a partir del día siguiente de la publicación de su Reglamento en el diario oficial El Peruano, salvo la quinta, sexta y séptima disposición complementaria final, la cuarta disposición complementaria transitoria; y la primera y la segunda disposición complementaria modificatoria;

Que, la quinta disposición complementaria final del mencionado Decreto Legislativo señala que los lodos generados por las plantas de tratamiento de agua para consumo humano, las plantas de tratamiento de aguas residuales y otros sistemas vinculados a la prestación de los servicios

de saneamiento, son manejados como residuos sólidos no peligrosos, salvo en los casos que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento determine lo contrario;

Que, la citada disposición establece que en ningún caso los lodos provenientes de los mencionados sistemas son utilizados sin considerar condiciones sanitarias y ambientales mínimas apropiadas, conforme lo dispone el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento;

Que, la séptima disposición complementaria final del mismo Decreto Legislativo, indica que el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento en el término de sesenta (60) días calendario, contado a partir de la entrada en vigencia del Decreto Legislativo, establece mediante Resolución Ministerial la regulación de las condiciones mínimas de manejo de lodos, así como lo referido a las instalaciones donde se realiza la disposición final de los lodos;

De conformidad con lo dispuesto en la Ley 27314, Ley General de Residuos Sólidos; la quinta y séptima disposición complementaria final del Decreto Legislativo 1278, Decreto Legislativo que aprueba la Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos; la Ley N° 30156, Ley de Organización y Funciones del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento; y su Reglamento de Organización y Funciones, aprobado por Decreto Supremo N° 010-2014-VIVIENDA, modificado por Decreto Supremo N° 006-2015-VIVIENDA;

SE RESUELVE:

Artículo 1.- Aprobación de las Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final

Aprobar las Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos y las Instalaciones para su Disposición Final que como anexo forma parte integrante de la presente Resolución Ministerial.

Artículo 2.- Publicación

Disponer la publicación de la presente Resolución Ministerial, con su respectivo anexo, en el Portal Institucional del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (www.vivienda.gob.pe) el mismo día de su publicación en el diario oficial El Peruano.

Regístrese, comuníquese y publíquese.

EDMER TRUJILLO MORI

Ministro de Vivienda, Construcción y Saneamiento

condiciones mínimas de manejo de lodos y las instalaciones para su disposición final

CAPÍTULO I

DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 1. Objeto

La presente norma tiene por objeto regular las condiciones mínimas para el manejo de los lodos generados en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP), plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y los provenientes de los servicios de disposición sanitaria de excretas y biosólidos. Incluye la regulación de las instalaciones donde se realiza la disposición final de lodos.

Artículo 2. Finalidad

La presente norma tiene como finalidad minimizar posibles impactos al ambiente, prevenir riesgos ambientales, proteger la salud y el bienestar de la persona y contribuir al desarrollo sostenible de los servicios de saneamiento.

Artículo 3. Ámbito de aplicación

Las condiciones, requisitos y procedimientos previstos en la presente norma se aplican a:

1. Los prestadores de servicios de saneamiento previstos en el párrafo 15.1 del artículo 15 del Decreto Legislativo N° 1280, Decreto Legislativo que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento.
2. Otros actores involucrados en el manejo de lodos indicados en la presente norma.

Artículo 4. Autoridad competente

El Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento es el Ente Rector del sector saneamiento que, a través de la Dirección General de Asuntos Ambientales (DGAA), supervisa y fiscaliza el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la presente norma.

Artículo 5. Definiciones

Para los efectos de la presente norma se consideran las siguientes definiciones:

1. **Almacenamiento:** Es el proceso u operación de acumulación temporal de lodos estabilizados o biosólidos en recipientes que resistan esfuerzos de corte y ataque químico. Dichos recipientes son impermeables y con dispositivo de cierre o cobertura.
2. **Biosólido:** Es el subproducto resultante de la estabilización de la fracción orgánica de los lodos generados en el tratamiento de aguas residuales, con características físicas, químicas

y microbiológicas que permiten su reaprovechamiento como acondicionador del suelo. No son biosólidos las cenizas producto de la incineración de lodos.

3. **Disposición final:** Es el proceso u operación para confinar en un lugar los lodos o biosólidos como último proceso de su manejo en forma permanente, sanitaria y ambientalmente segura.
4. **Estabilización de lodo:** Es el proceso de reducción de fracción orgánica (Sólidos Volátiles) en relación a la materia seca (Sólidos Totales) para controlar la degradación biológica en el producto, los potenciales de generación de olores, de atracción de vectores y de patogenicidad, aplicados a lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales.
5. **Generador:** Se denomina así a los prestadores de servicio de saneamiento y/u operadores privados que generen residuos sólidos y lodos en la prestación del servicio de agua potable, servicio de alcantarillado sanitario, servicio de tratamiento de agua residual y servicio de disposición sanitaria de excretas.
6. **Humedad:** Es la concentración de agua contenida en los lodos y biosólidos.
7. **Instalaciones para disposición final de lodos:** Es la infraestructura que permite disponer los lodos. Son instalaciones para disposición final de lodos: los rellenos sanitarios y los monorellenos.
8. **Línea de tratamiento de lodos:** Son los procesos y operaciones unitarias que en forma secuencial permiten el adensamiento, estabilización, conducción y/o deshidratación de lodos en una planta de tratamiento de aguas residuales.
9. **Lodo generado en PTAP:** Es el sedimento acuoso o pastoso en el que se concentran los sólidos sedimentados o decantados del agua y lavado de filtros.
10. **Lodo generado en PTAR:** Es el sedimento acuoso o pastoso en el que concentran los sólidos sedimentados o decantados del agua residual, del reactor biológico o de un proceso terciario.
11. **Lodos fecales:** Son los lodos extraídos periódicamente del servicio de disposición sanitaria de excretas tales como letrinas, pozos ciegos y tanques sépticos.
12. **Minimización:** Es la reducción del volumen de residuos sólidos y lodos por deshidratación y reducción de la carga contaminante por procesos de estabilización.
13. **Monorelleno:** Es la infraestructura de disposición final exclusiva para lodos tratados de plantas de tratamiento de aguas residuales.
14. **Plan de Minimización y Manejo de Residuos Sólidos:** Es el documento de planificación

que describe las acciones de minimización y gestión de los residuos sólidos que el generador debe seguir con la finalidad de garantizar un manejo ambiental y sanitariamente adecuado. A efectos de la presente norma, el Plan incluye la gestión y manejo de los lodos.

15. **Reaprovechamiento:** Es el proceso a través del cual se vuelve a obtener un beneficio del lodo o biosólido, permitiendo su reutilización para otros fines.
16. **Recolección:** Es la acción de recoger los lodos para transferirlos mediante un medio de locomoción apropiado, y luego continuar su posterior manejo, en forma sanitaria, segura y ambientalmente adecuada.
17. **Residuos sólidos de saneamiento:** Es cualquier objeto, material, sustancia o elemento retirado de las labores de mantenimiento de los sistemas que conforman los servicios de saneamiento: alcantarillado sanitario, y del pretratamiento aplicado en una PTAP o PTAR. Comprende además los lodos obtenidos del tratamiento de agua potable, del tratamiento de aguas residuales, y del servicio de disposición sanitaria de excretas.
18. **Sólidos Totales (ST):** Es la materia seca concentrada en los lodos y/o biosólidos que han sido deshidratados hasta alcanzar un peso constante. El valor que se ha evaporado en este proceso corresponde a la humedad.
19. **Sólidos Volátiles (SV):** Son los sólidos orgánicos presentes en los Sólidos Totales (ST) que se volatilizan cuando una muestra secada se quema en condiciones controladas.
20. **Transporte:** Es el proceso de manejo de residuos sólidos, lodos y/o biosólidos que consiste en su traslado apropiado hasta las instalaciones de valorización, reaprovechamiento o disposición final, según corresponda, empleando vehículos y medidas de seguridad apropiados con las especificaciones establecidas por la autoridad competente sectorial.
21. **Tratamiento:** Es cualquier proceso, método o técnica que permita modificar la característica física, química o biológica del residuo o lodo, a fin de reducir o eliminar su potencial peligro de causar daños a la salud y el ambiente, con el objetivo de prepararlo para su posterior valorización o disposición final.
22. **Vectores:** Son organismos capaces de transportar y transmitir agentes infecciosos, tales como roedores, moscas, mosquitos, entre otros.

Anexo 07. Galería de fotos



Figura 6.1. El sólido retirado del colector (Underflow) una vez recogida en un balde se llevó al lecho para su secado.



Figura 6.2. El secado de sólidos en el lecho se hizo con fines de ser pesado para saber qué cantidad se ha retirado en dicha evaluación.



Figura 6.3. Se ha recogido todos los sólidos una vez secado en el lecho, para pesar la cantidad de sólidos retirados.



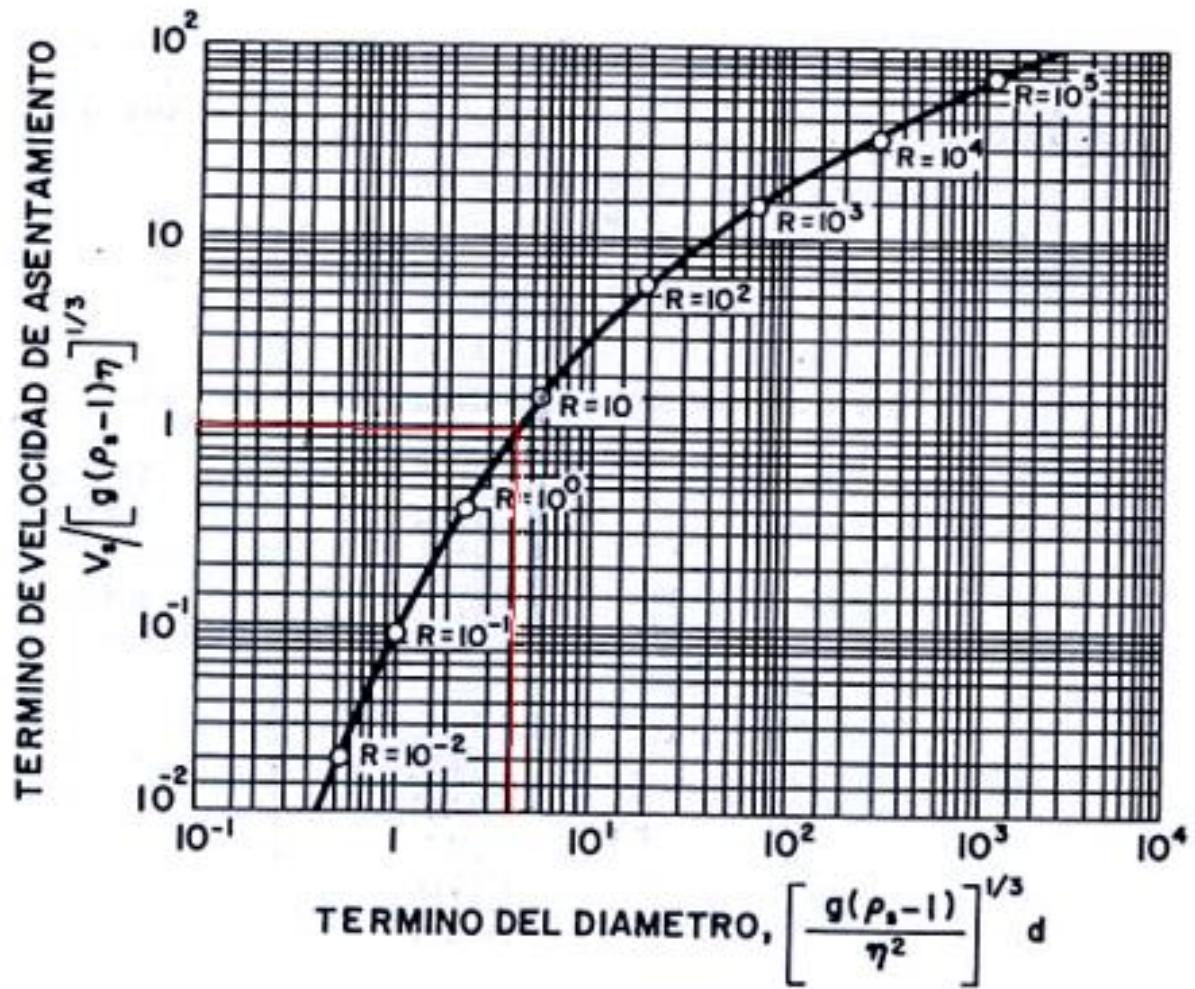
Figura 6.4. El Dr. Dirk Loose alemán, especialista en PTAR dio sugerencias para seguir con la evaluación en la unidad de lecho de secado.

Anexo 08. Tabla de densidad y viscosidad del agua a diferentes temperaturas

Temperatura (°C)	Densidad (g/cm ³)	Viscosidad cinemática x 10 ⁻² (cm ² /s)
0	0.99987	1.7923
1	0.99993	1.7321
2	0.99997	1.6741
3	0.99999	1.6193
4	1.00000	1.5676
5	0.99999	1.5188
6	0.99997	1.4726
7	0.99993	1.4288
8	0.99988	1.3874
9	0.99981	1.3479
10	0.99973	1.3101
11	0.99963	1.2740
12	0.99952	1.2396
13	0.99940	1.2068
14	0.99927	1.1756
15	0.99913	1.1457
16	0.99897	1.1168
17	0.99880	1.0888
18	0.99862	1.0618
19	0.99843	1.0356
20	0.99823	1.0105
21	0.99802	0.9863
22	0.99780	0.9629
23	0.99757	0.9403
24	0.99733	0.9186
25	0.99707	0.8975
26	0.99681	0.8774
27	0.99654	0.8581
28	0.99626	0.8394
29	0.99597	0.8214
30	0.99568	0.8039
31	0.99537	0.7870
32	0.99505	0.7708
33	0.99473	0.7551
34	0.99440	0.7398
35	0.99406	0.7251
36	0.99371	0.7109
37	0.99336	0.6971
38	0.99299	0.6839
39	0.99262	0.6711

Fuente: Rivas, Mijares (1978), Tratamientos de aguas residuales.

Anexo 09. Gráfico de valores de sedimentación



Fuente: Rivas, Mijares (1978), Tratamientos de aguas residuales.

Anexo 10. Datos de resultados experimentales del hidrociclón

a) Caudal 6,3466 L/s

1. Entrada (alimentación) al hidrociclón
2. Salida (rebose) del hidrociclón
3. Salida (descarga) del hidrociclón

Tabla 9.1.

Determinación de concentración de sólidos a la entrada y salida para F=6,3466 L/s

Ensayo	Masa papel filtro (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa muestra (g)	Concentración de sólidos (g/mL)
1	0,9083	0,9264	0,0181	$4,5250 \times 10^{-4}$
2	0,8982	0,9047	0,0065	$1,6250 \times 10^{-4}$
3	0,8806	0,9582	0,0776	$1,9400 \times 10^{-3}$

Tabla 9.2

Determinación de arena sometiendo a una mufla a 550 °C para F=6,3466 L/s

Ensayo	Masa crisol (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa de crisol + papel filtro + muestra (g)	Masa de papel filtro (g)	Masa de arena (g)
1	48,9396	0,9264	48,9462	0,9083	0,0115
2	47,2999	0,9051	47,3047	0,8982	0,0021
3	48,0157	0,9579	48,0343	0,8806	0,0587

Tabla 9.3

Determinación de concentración de arena en 40 mL de muestra para F=6,3466 L/s

Ensayo	Concentración de la arena (g/mL)
1	$2,8750 \times 10^{-4}$
2	$5,2500 \times 10^{-5}$
3	$1,4675 \times 10^{-3}$

b) Caudal 7,0931 L/s

1. Entrada (alimentación) al hidrociclón
2. Salida (rebose) del hidrociclón
3. Salida (descarga) del hidrociclón

Tabla 9.4.

Determinación de concentración de sólidos en la entrada y salida para F=7,0931 L/s

Ensayo	Masa papel filtro (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa muestra (g)	Concentración de sólidos (g/mL)
1	0,9068	0,9264	0,0187	$4,6750 \times 10^{-4}$
2	0,8995	0,9047	0,0057	$1,4250 \times 10^{-4}$
3	0,8984	0,9582	0,0801	$2,0025 \times 10^{-3}$

Tabla 9.5.

Determinación de arena sometiendo en una mufla a 550 °C para F=7,0931 L/s

Ensayo	Masa crisol (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa de crisol + papel filtro + muestra (g)	Masa de papel filtro (g)	Masa de arena (g)
1	48,9396	0,9264	48,9462	0,9068	0,0122
2	47,2999	0,9051	47,3047	0,8995	0,0019
3	48,0157	0,9579	48,0343	0,8984	0,0613

Tabla 9.6.

Determinación de concentración de arena en 40 mL de muestra para F=7.0931 L/s

Ensayo	Concentración de la arena (g/mL)
1	$3,0500 \times 10^{-4}$
2	$4,5000 \times 10^{-5}$
3	$1,5325 \times 10^{-3}$

c) Caudal 8,2721 L/s

1. Entrada (alimentación) al hidrociclón
2. Salida (rebose) del hidrociclón
3. Salida (descarga) del hidrociclón

Tabla 9.7.

Determinación de concentración de sólidos en la entrada y salida para $F=8,2721$ L/s

Ensayo	Masa papel filtro (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa muestra (g)	Concentración de sólidos (g/mL)
1	0,9483	0,9681	0,0198	$4,9500 \times 10^{-4}$
2	0,9105	0,9136	0,0031	$7,7500 \times 10^{-5}$
3	0,8976	0,9957	0,0981	$2,4525 \times 10^{-3}$

Tabla 9.8.

Determinación de arena sometiendo en una mufla a 550°C para $F=8,2721$ L/s

Ensayo	Masa crisol (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa de crisol + papel filtro + muestra (g)	Masa de papel filtro (g)	Masa de arena (g)
1	48,9384	0,9681	48,9434	0,9483	0,0148
2	47,3022	0,9136	47,3044	0,9105	0,0009
3	48,9564	0,9957	48,9745	0,8976	0,0800

Tabla 9.9.

Determinación de concentración de arena en 40mL de muestra para $F=8,2721$ L/s

Ensayo	Concentración de la arena (g/mL)
1	$3,7000 \times 10^{-4}$
2	$2,2500 \times 10^{-5}$
3	$2,0000 \times 10^{-3}$

d) Caudal 9,1660 L/s

1. Entrada (alimentación) al hidrociclón
2. Salida (rebose) del hidrociclón
3. Salida (descarga) del hidrociclón

Tabla 9.10.

Determinación de concentración de sólidos en la entrada y salida para F=9,1660 L/s

Ensayo	Masa papel filtro (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa muestra (g)	Concentración de sólidos (g/mL)
1	0,9559	0,9757	0,0201	$5,0250 \times 10^{-4}$
2	0,8963	0,8986	0,0024	$6,0000 \times 10^{-5}$
3	0,9023	1,0070	0,0991	$2,4775 \times 10^{-3}$

Tabla 9.11.

Determinación de arena sometiendo en una mufla a 550°C para F=9,1660 L/s

Ensayo	Masa crisol (g)	Masa de papel filtro + muestra (g)	Masa de crisol + papel filtro + muestra (g)	Masa de papel filtro (g)	Masa de arena (g)
1	48,9384	0,9720	48,94330	0,9559	0,0151
2	47,3022	0,9143	47,32013	0,8963	0,0004
3	47,1220	0,9710	47,14730	0,8936	0,0807

Tabla 9.12

Determinación de concentración de arena en 40 mL de muestra para F=9,1660 L/s

Ensayo	Concentración de la arena (g/mL)
1	$3,7750 \times 10^{-4}$
2	$1,0000 \times 10^{-5}$
3	$2,0175 \times 10^{-3}$

Anexo 11. Costeo de materiales de construcción, instalación y operación del hidrociclón

Los costos de los materiales de construcción, accesorios, mano de obra, instalación y operación para realizar este trabajo de investigación fueron los siguientes:

Tabla 11.1

Costo de materiales del hidrociclón

Costo de materiales de construcción			
Material	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Importe (S/.)
Planchas 1,2 mm hierro galvanizado	1	60	60
Bridas de 1/8 de espesor	3	30	90
Tubo de 2 pulgadas hierro galvanizado	2	20	40
Pernos 3/8 pulgadas	12	0,30	3,50
Total S/.			193,5

Costo de los accesorios y bomba			
Accesorio	Cantidad	Precio unitario (S/.)	Importe (S/.)
Válvulas de 2 pulgadas PVC	2	20	40
T de 2 pulgadas PVC	1	8	8
Tubo de 2 pulgadas PVC	1	20	20
Codo de 2 pulgadas PVC	2	8	16
Manómetro (1- 50 psi)	1	35	35
Electrobomba sumergible Pedrollo (1hp)	1	1,500	1 500
Total S/.			1 619

Tabla 11.2*Costo de mano de obra y operación del hidrociclón*

Costo de mano de obra, operación y prestación de servicio			
Mano de obra	Días	Sueldo por días (S/.)	Importe (S/.)
Servicio de taller	10	20	200
Soldador	1	30	30
Constructor	10	50	500
Instalación	2	50	100
Operación	5	50	250
Total S/.			1 080

Tabla 11.3*Costo total de la construcción del hidrociclón*

Costo total en la construcción del equipo	
Costo de materiales de construcción	S/.193,5
Costo de los accesorios y bomba	S/.1 619
Costo de mano de obra, operación y prestación de servicio	S/.1 080
Total S/.	2 892,5

El gasto generado en la etapa de construcción, instalación y operación de la investigación fue 2 892,5 nuevos soles.

Tabla 11.4*Costo del hidrociclón*

Estimación del costo del hidrociclón	
Costo del equipo completo incluido mano de obra	S/.1 800

El costo del hidrociclón con su respectivo colector de arena, incluido el material de construcción y mano de obra fue presupuestado a 1 800 soles.