

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y DE ENERGÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA
REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ.
PAPELERA REYES S.A.C”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
MECÁNICO**

AUTORES

Jimenez Noriega Piero Ricardo

Cisa Regalado Julio Davis

Zavala Rivera Christian Andre

ASESOR

Mg. Vladimiro Contreras Tito

LINEA DE INVESTIGACIÓN: Ingeniería y tecnología

Callao, 2024
PERÚ

INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD:

Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN:

Unidad de investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica y de Energía.

TÍTULO:

“Diseño de un sistema de filtrado de lodo para optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú. Papelera Reyes S.A.C”

AUTOR 1: Zavala Rivera, Christian Andre

DNI: 47133575

ORCID: 0000-0002-2890-4410

AUTOR 2: Cisa Regalado, Julio Davis

DNI: 45481608

ORCID: 0009-0008-2358-9731

AUTOR 3: Jimenez Noriega, Piero Ricardo

DNI: 73808866

ORCID: 0009-0001-6746-1173

ASESOR: Mg. Vladimiro Contreras Tito

DNI: 23949023

ORCID: 0000-0002-8885-1031

LUGAR DE EJECUCIÓN:

Callao - Callao - Perú

UNIDAD DE ANÁLISIS:

Sistema de filtrado de lodo

TIPO:

Aplicada

ENFOQUE:

Cuantitativo

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:

No Experimental

TEMA OCDE:

2.03.01 Ingeniería mecánica

HOJA DE REFERENCIA Y APROBACIÓN

MIEMBROS DEL JURADO

PRESIDENTE DE JURADO DE TESIS: Dr. Juan Manuel, Palomino Correa

SECRETARIO: Mg. Adolfo Orlando, Blas Zarzosa

MIEMBRO: Mg. Jose Luis, Yupanqui Perez

ASESOR: Mg. Vladimiro Contreras Tito

N° DE LIBRO: 001

N° DE FOLIO: 215

N° DE ACTA: 189

FECHA DE APROBACIÓN DE TESIS: 17 de agosto del año 2024

RESOLUCIÓN DE CONSEJO DE FACULTAD: 150-2023-CU

**ACTA N°189 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO**

**LIBRO 001, FOLIO N°215, ACTA N°189 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO TALLER DE
TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO.**

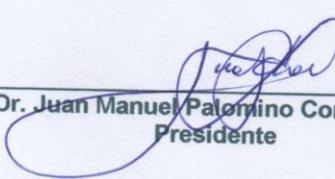
A los 17 días del mes de agosto del año 2024, siendo las 10:20 a.m, se reunieron en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña" sito Av. Juan Pablo II N° 306 Bellavista – Callao, los miembros del **Jurado Evaluador de Sustentación del I Ciclo Taller de Tesis 2024**, designado con Resolución de Consejo de Facultad N° 110-2024-CF-FIME – Callao, 23 de abril de 2024, para la obtención de los **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

- | | | |
|-----------------------------------|---|------------|
| ▪ Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA | : | Presidente |
| ▪ Mg. ADOLFO ORLANDO BLAS ZARZOSA | : | Secretario |
| ▪ Mg. JOSÉ LUIS YUPANQUI PÉREZ | : | Vocal |

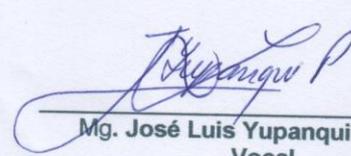
Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis del Bachiller **PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA**, quien habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de **INGENIERO MECÁNICO**, sustenta la tesis "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ. PAPELERA REYES S.A.C**", cumpliendo con la sustentación en acto público de acuerdo al artículo 56° de la Resolución de Consejo Universitario N° 150 -2023-CU.- CALLAO, 15 de junio del 2023.

Con el quórum reglamentario, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición y la absolución de las preguntas formuladas por el jurado, y efectuada la deliberación pertinente, acordó por unanimidad: Dar por **APROBADO** en la escala de calificación cualitativa **BUENO**, y con calificación cuantitativa de **14 (CATORCE)**, conforme a lo dispuesto en el Artículo 24° del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU- CALLAO, 15 de junio de 2023.

Se dio por cerrada la Sesión a las 11:00 a.m. del día 17 de agosto de 2024.


Dr. Juan Manuel Palomino Correa
Presidente


Mg. Adolfo Orlando Blas Zarzosa
Secretario


Mg. José Luis Yupanqui Pérez
Vocal

**ACTA N°190 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO**

**LIBRO 001, FOLIO N°216, ACTA N°190 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO TALLER DE
TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO.**

A los 17 días del mes de agosto del año 2024, siendo las 10:20 a.m, se reunieron en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña" sito Av. Juan Pablo II N° 306 Bellavista – Callao, los miembros del **Jurado Evaluador de Sustentación del I Ciclo Taller de Tesis 2024**, designado con Resolución de Consejo de Facultad N° 110-2024-CF-FIME – Callao, 23 de abril de 2024, para la obtención de los **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

- | | | |
|-----------------------------------|---|------------|
| ▪ Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA | : | Presidente |
| ▪ Mg. ADOLFO ORLANDO BLAS ZARZOSA | : | Secretario |
| ▪ Mg. JOSÉ LUIS YUPANQUI PÉREZ | : | Vocal |

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis del Bachiller **JULIO DAVIS CISA REGALADO**, quien habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de **INGENIERO MECÁNICO**, sustenta la tesis "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ. PAPELERA REYES S.A.C**", cumpliendo con la sustentación en acto público de acuerdo al artículo 56° de la Resolución de Consejo Universitario N° 150 -2023-CU.- CALLAO, 15 de junio del 2023.

Con el quórum reglamentario, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición y la absolución de las preguntas formuladas por el jurado, y efectuada la deliberación pertinente, acordó por unanimidad: Dar por **APROBADO** en la escala de calificación cualitativa **BUENO**, y con calificación cuantitativa de **14 (CATORCE)**, conforme a lo dispuesto en el Artículo 24° del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU- CALLAO, 15 de junio de 2023.

Se dio por cerrada la Sesión a las 11:00 a.m. del día 17 de agosto de 2024.



Dr. Juan Manuel Palomino Correa
Presidente



Mg. Adolfo Orlando Blas Zarzosa
Secretario



Mg. José Luis Yupanqui Pérez
Vocal

**ACTA N°191 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO**

**LIBRO 001, FOLIO N°217, ACTA N°191 DE SUSTENTACIÓN DE TESIS CON CICLO TALLER DE
TESIS PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO.**

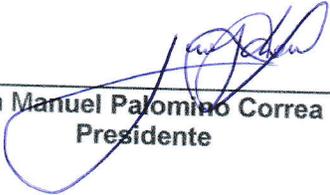
A los 17 días del mes de agosto del año 2024, siendo las 10:20 a.m, se reunieron en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña" sito Av. Juan Pablo II N° 306 Bellavista – Callao, los miembros del **Jurado Evaluador de Sustentación del I Ciclo Taller de Tesis 2024**, designado con Resolución de Consejo de Facultad N° 110-2024-CF-FIME – Callao, 23 de abril de 2024, para la obtención de los **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO**, conformado por los siguientes docentes ordinarios de la Universidad Nacional del Callao:

- | | | |
|-----------------------------------|---|------------|
| ▪ Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA | : | Presidente |
| ▪ Mg. ADOLFO ORLANDO BLAS ZARZOSA | : | Secretario |
| ▪ Mg. JOSÉ LUIS YUPANQUI PÉREZ | : | Vocal |

Se dio inicio al acto de sustentación de la tesis del Bachiller **CHRISTIAN ANDRE ZAVALA RIVERA**, quien habiendo cumplido con los requisitos para optar el Título Profesional de **INGENIERO MECÁNICO**, sustenta la tesis "**DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ. PAPELERA REYES S.A.C**", cumpliendo con la sustentación en acto público de acuerdo al artículo 56° de la Resolución de Consejo Universitario N° 150 -2023-CU.- CALLAO, 15 de junio del 2023.

Con el quórum reglamentario, se dio inicio a la exposición de conformidad con lo establecido por el Reglamento de Grados y Títulos vigente. Luego de la exposición y la absolución de las preguntas formuladas por el jurado, y efectuada la deliberación pertinente, acordó por unanimidad: Dar por **APROBADO** en la escala de calificación cualitativa **BUENO**, y con calificación cuantitativa de **14 (CATORCE)**, conforme a lo dispuesto en el Artículo 24° del Reglamento de Grados y Títulos de la UNAC, aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 150-2023-CU- CALLAO, 15 de junio de 2023.

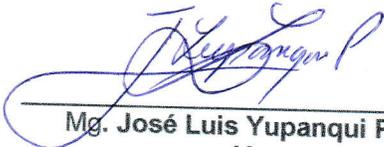
Se dio por cerrada la Sesión a las 11:00 a.m. del día 17 de agosto de 2024.



Dr. Juan Manuel Palomino Correa
Presidente



Mg. Adolfo Orlando Blas Zarzosa
Secretario



Mg. José Luis Yupanqui Pérez
Vocal

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y DE ENERGÍA
Jurado Evaluador en las Sustentaciones de Tesis

I N F O R M E

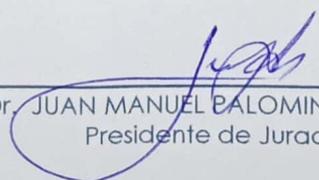
Visto la *Tesis* titulado "DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ. PAPELERA REYES S.A.C", presentado por el(la) **Bachiller de Ingeniería Mecánica JIMENEZ NORIEGA PIERO RICARDO**.

A QUIEN CORRESPONDA:

El *Presidente del Jurado Evaluador en la Sustentación de Tesis*, manifiesta que la Tesis se realizó el sábado 17 de agosto del 2024 a las 10:20 a.m. en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña", no habiendo observaciones ni correcciones que incluir, el mismo que en su oportunidad fue cuidadosamente evaluado por cada uno de los miembros del Jurado Evaluador, no presentando ninguna observación en su estructura metodológica y contenido temático.

Se emite el presente informe favorable para los fines pertinentes.

Bellavista, 17 de agosto del 2024



Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA
Presidente de Jurado

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y DE ENERGÍA
Jurado Evaluador en las Sustentaciones de Tesis

I N F O R M E

Visto la **Tesis** titulado “DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ. PAPELERA REYES S.A.C”, presentado por el(la) **Bachiller de Ingeniería Mecánica CISA REGALADO, Julio Davis**.

A QUIEN CORRESPONDA:

El **Presidente del Jurado Evaluador en la Sustentación de Tesis**, manifiesta que la Tesis se realizó el sábado 17 de agosto del 2024 a las 10:20 a.m. en el Auditorio “Ausberto Rojas Saldaña”, no habiendo observaciones ni correcciones que incluir, el mismo que en su oportunidad fue cuidadosamente evaluado por cada uno de los miembros del Jurado Evaluador, no presentando ninguna observación en su estructura metodológica y contenido temático.

Se emite el presente informe favorable para los fines pertinentes.

Bellavista, 17 de agosto del 2024



Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA
Presidente de Jurado

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y DE ENERGÍA
Jurado Evaluador en las Sustentaciones de Tesis

I N F O R M E

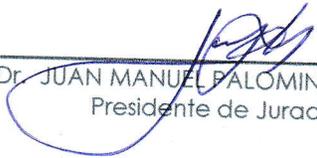
Visto la **Tesis** titulado "DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODO PARA OPTIMIZAR LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE PAPEL TISÚ. PAPELERA REYES S.A.C", presentado por el(la) **Bachiller de Ingeniería Mecánica ZAVALA RIVERA, Christian Andre.**

A QUIEN CORRESPONDA:

El **Presidente del Jurado Evaluador en la Sustentación de Tesis**, manifiesta que la Tesis se realizó el sábado 17 de agosto del 2024 a las 10:20 a.m. en el Auditorio "Ausberto Rojas Saldaña", no habiendo observaciones ni correcciones que incluir, el mismo que en su oportunidad fue cuidadosamente evaluado por cada uno de los miembros del Jurado Evaluador, no presentando ninguna observación en su estructura metodológica y contenido temático.

Se emite el presente informe favorable para los fines pertinentes.

Bellavista, 17 de agosto del 2024


Dr. JUAN MANUEL PALOMINO CORREA
Presidente de Jurado

INFORME FINAL DE TESIS - Jimenez N. - Cisa R. - Zavala R. (6)

5%
Textos sospechosos

5% Similitudes
0% similitudes entre comillas
1% entre las fuentes mencionadas
< 1% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: INFORME FINAL DE TESIS - Jimenez N. - Cisa R. - Zavala R. (6).pdf ID del documento: a5ed2e51c80a75a177ed01d16cbcf8c5eb8dd590 Tamaño del documento original: 5,55 MB	Depositante: FIME PREGRADO UNIDAD DE INVESTIGACION Fecha de depósito: 13/8/2024 Tipo de carga: interface fecha de fin de análisis: 13/8/2024	Número de palabras: 29.659 Número de caracteres: 200.338
--	---	---

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	upcommons.upc.edu https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5400/02_Memoria.pdf	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (222 palabras)
2	reprobib.ubiobio.cl http://reprobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf 1 fuente similar	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (166 palabras)
3	www.scielo.org.pe Deshidratación de lodo residual a escala piloto en un secador... http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2309-04132023000100021 2 fuentes similares	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (129 palabras)
4	idoc.pub Agitación De Líquidos [eljqw1r3yd41] https://idoc.pub/documents/idocpub-eljqw1r3yd41	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (134 palabras)
5	repository.unad.edu.co http://repository.unad.edu.co/bitstream/10596/30321/1/yleal0.pdf	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (112 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	dx.doi.org Vol. 33 Núm. 1 (2023) TECNIA http://dx.doi.org/10.21754/tecnia.v33i1	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
2	repositorio.urp.edu.pe Propuesta de reaprovechamiento de lodos de filtración: C... https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4458	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (33 palabras)
3	condorchem.com Procesos y tecnologías para el tratamiento de lodos https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-de-lodos/	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
4	repositorio.continental.edu.pe https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11365/2/IV_FIN_107_TE_Tito_Sanchez...	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (10 palabras)
5	1library.co Diseño de un reactor de tanque agitado continuo con fines didácticos https://1library.co/document/yrogikvy-diseno-reactor-tanque-agitado-continuo-fines-didacticos.html	< 1%		🔗 Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas) Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://hidrostalsa.pump-flo.com/
2	https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf
3	http://go.asme.org/831committee
4	https://grzg.andritz.com/c/com2011/00/03/90/39042/1/1/0/
5	https://grzg.andritz.com/c/com2011/00/04/16/41677/1/1/0/22254849/se

DEDICATORIA

A la familia Zavala Rivera, Cisa Regalado y Jimenez Noriega, este trabajo está dedicado a ellos porque es el fruto del esfuerzo que hicieron para brindarnos una educación a lo largo de toda nuestra vida.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a nuestros padres, por dedicar su tiempo y esfuerzo en brindarnos todas las comodidades necesarias para obtener una educación profesional.

Agradecemos a nuestra casa de estudios, la Universidad Nacional del Callao y en particular a los profesores de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Energía porque a través de su conocimiento y experiencia compartida, nos inspiraron a crecer cada vez con más pasión en la ingeniería mecánica.

Agradecemos a todos los profesionales de ingeniería porque gracias a sus aportes en investigación se pudo desarrollar esta tesis.

Por último, hacemos una mención a la empresa Papelera Reyes S.A.C, gracias por permitirnos participar en el proyecto en cuestión y obtener la información necesaria para desarrollar la presente investigación.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE ABREVIATURAS	9
RESUMEN	10
ABSTRACT	11
INTRODUCCIÓN	12
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1. Descripción de la realidad problemática.....	14
1.2. Formulación del problema	15
1.2.1. Problema general.....	15
1.2.2. Problemas específicos.....	16
1.3. Objetivos	16
1.3.1 Objetivo general.....	16
1.3.2 Objetivos específicos	16
1.4. Justificación.....	16
1.4.1 Justificación Técnica	16
1.4.2 Justificación Económica	17
1.4.3 Justificación Ambiental	17
1.5. Delimitantes de la investigación	18
1.5.1 Delimitante Teórica.....	18
1.5.2 Delimitante Temporal.....	18
1.5.3 Delimitante Espacial	18
II. MARCO TEÓRICO	19
2.1 Antecedentes:	19
2.1.1 Antecedentes Internacionales.....	19

2.1.2	Antecedentes Nacionales	21
2.2	Bases teóricas	23
2.2.1	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR).....	23
2.2.2	Sistemas de filtrado de lodos.....	24
2.2.3	Procedencia, cantidad y características del lodo.....	25
2.2.4	Operaciones de pretratamiento	28
2.2.5	Espesamiento.....	32
2.2.6	Deshidratación.....	35
2.2.7	Acondicionamiento químico.....	39
2.2.8	Transporte del lodo.....	41
2.2.9	Lodo de industria papelera	48
2.2.11	Clarificación	48
2.2.12	Software Pipe Flow Expert V7.40	48
2.2.13	Plataforma Pump-Flo.....	49
2.2.14	Matriz Pugh	49
2.2	Marco conceptual	50
2.3	Definición de términos básicos	51
III.	HIPÓTESIS Y VARIABLES	54
3.1	Hipótesis.....	54
3.1.1	Hipótesis General	54
3.1.2	Hipótesis Específicas	54
3.2.	Operacionalización de variable.....	55
IV.	METODOLOGÍA DEL PROYECTO	56
4.1	Diseño metodológico	56
4.1.1	Tipo de investigación	56
4.1.2	Enfoque de la investigación	56
4.1.3	Nivel de investigación	57

4.1.4	Diseño de la investigación	57
4.2.	Método de investigación.	57
4.3.	Población y muestra	59
4.4.	Lugar de estudio.	59
4.5.	Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	60
4.5.1	Técnicas	60
4.5.2	Instrumentos	60
4.6.	Análisis y procesamiento de datos.	60
4.6.1	Caracterización y cuantificación (Procedencia del lodo)	62
4.6.2.	Dimensionamiento y selección de los componentes	65
4.6.3	Simulación del transporte de lodo a través del sistema.....	103
4.6.4	Reutilización de agua con el sistema de filtrado de lodos	115
4.7.	Aspectos éticos en Investigación	120
V.	RESULTADOS	121
VI.	DISCUSIONES DE RESULTADOS.....	133
6.1.	Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados.....	133
6.2.	Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	135
6.3.	Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes	136
VII.	CONCLUSIONES	137
VIII.	RECOMENDACIONES.....	139
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	141
X.	ANEXOS.....	149
	Anexo N° 1: Matriz de consistencia.	149
	Anexo N° 2: Autorización de la empresa Papelera Reyes S.A.C.....	150
	Anexo N° 3: Copia de DNI del representante de área.	151
	Anexo N° 4: Informe de muestra de lodos en Papelera Reyes S.A.C.	152
	Anexo N° 5: Dimensiones ANSI para tuberías de acero al carbono	153

Anexo N° 6: Valores de aspereza de superficie para diversos materiales	154
Anexo N° 7: Diagrama de Moody.	155
Anexo N° 8: Coeficiente de pérdida K en ingreso y salida de tuberías.	156
Anexo N° 9: Coeficiente de pérdida K en accesorios o válvulas.....	157
Anexo N° 10: Ficha de datos de la bomba Hidrostral ISO 2858-INOX.	158
Anexo N° 11: Curva característica de la bomba Hidrostral ISO 2858.....	159
Anexo N° 12: Hoja de datos de bomba seleccionada en Pump-Flo.	160
Anexo N° 13: Resultados en la simulación de Pipe Flow Expert V 7.40..	161
Anexo N° 14: Estructura tarifaria de agua potable (SEDAPAL).....	162
Anexo N° 15: Vista frontal del sistema de filtrado de lodos.	163
Anexo N° 16: Vista de planta del sistema de filtrado de lodos.....	164
Anexo N° 17: Vista perfil del sistema de filtrado de lodos.....	165
Anexo N° 18: Vista isométrica del sistema de filtrado de lodos.	166
Anexo N° 19: Esquema en 3D del sistema de filtrado de lodos.....	167
Anexo N° 20: Sistema de dosificación de polímero.	168
Anexo N° 21: Diagrama PID de la PTAR existente.....	169
Anexo N° 22: PID del Sistema de filtrado de lodos ingresado a la PTAR.	170

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de Ishikawa.....	15
Figura 2.1: Esquema para dimensionar un agitador mecánico	29
Figura 2.2: Espesamiento de lodos por gravedad en bandas	33
Figura 2.3: Principales tecnologías de deshidratación	36
Figura 2.4: Sistema dosificador de polímero habitual	41
Figura 2.5: Parámetro FL en función a la carga de sólidos	47
Figura 2.6: Conclusiones importantes de investigaciones referenciales	50
Figura 4.1: Método de investigación	58
Figura 4.2: Lugar de estudio	59
Figura 4.3: Hoja de ruta para diseñar un sistema de filtrado de lodo	61
Figura 4.4: Fuentes generadoras de lodo residual.....	62
Figura 4.5: Diagrama de producción de lodo en el mes de agosto de 2023 ..	64
Figura 4.7: Balance de flujos en el tanque de lodos.....	69
Figura 4.8: Equipo de espesamiento de gravedad por bandas	72
Figura 4.9: Balance de flujos en el espesador de gravedad por bandas.....	73
Figura 4.10: Equipo deshidratador filtro prensa de bandas.....	77
Figura 4.11: Balance de flujos en equipo deshidratador	78
Figura 4.12: Bomba doble diafragma Wilden 0.05 Pro-Flo	82
Figura 4.13: Bomba doble diafragma Wilden 0.15 Pro-Flo	83
Figura 4.14: Agitador Savino Barbera AR30	85
Figura 4.15: Sistema de dosificación de polímero.....	86
Figura 4.16: Sistema de transporte del lodo	87
Figura 4.17: Gráfico de Mac-Elvain y Cave.....	90
Figura 4.18: Curva del sistema	100

Figura 4.19: Curva característica de la bomba H-Q, η - Q	101
Figura 4.20: Determinación gráfica del punto de operación	102
Figura 4.21: Esquema del sistema de filtrado de lodos.....	103
Figura 4.22: Selección del fluido a transportar	104
Figura 4.23: Selección del diámetro y material de la tubería	105
Figura 4.24: Selección de accesorios en las tuberías del sistema	106
Figura 4.25: Bomba definida para transportar 25 m ³ /h de lodo.....	107
Figura 4.26: Resultados del sistema de filtrado a caudal definido	107
Figura 4.27: Plataforma Pump-Flo	108
Figura 4.28: Datos de entrada para la plataforma Pump-Flo	109
Figura 4.29: Lista de bombas que cumplen con la función	111
Figura 4.30: Curva característica de Hidrostral ISO 2858 - INOX	111
Figura 4.31: Puntos de operación de Hidrostral ISO 2858 - INOX	112
Figura 4.32: Datos de la bomba en software Pipe Flow Expert	112
Figura 4.33: Intercepción de la curva de la bomba y del sistema.....	113
Figura 4.34: Resultados de la simulación	114
Figura 4.35: Balance global de caudal de filtrado	115
Figura 4.36: Balance de flujos de consumo sin sistema de filtrado de lodos .	117
Figura 4.37: Balance de flujos con la implementación del sistema de filtrado	118
Figura 5.1: Fuentes generadoras de lodo residual.....	121
Figura 5.2: Diseño en 3D del sistema de filtrado de lodos	124
Figura 5.3: Sistema de filtrado insertado en la PTAR	125
Figura 5.4: Punto de operación con la bomba Hidrostral ISO 2858 – INOX....	126
Figura 5.5: Resumen de resultados de la simulación.....	127
Figura 5.6: Balance de flujos de consumo con sistema de filtrado de lodos ..	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Promedio mensual en el período 2019 y 2023.....	14
Tabla 2.1: Función de operaciones en el tratamiento del lodo.....	24
Tabla 2.2: Tipo de lodo según procedencia	25
Tabla 2.3: Propiedades físicas y químicas del lodo	26
Tabla 2.4: Valores típicos de lodos en PTAR.....	27
Tabla 2.5: Valores de KT según tipo de impulsor.....	32
Tabla 2.6: Cualidades de principales equipos de espesamiento de lodos	34
Tabla 2.7: Carga hidráulica y carga de sólidos según tamaño de banda.....	35
Tabla 2.8: Cualidades de principales equipos de deshidratación de lodos	37
Tabla 2.9: Cualidades de polímeros líquidos y sólidos	39
Tabla 2.10: Cantidad de dosificación de polímero	40
Tabla 2.11: Valores de rugosidad de Darcy	44
Tabla 2.12: Coeficientes de pérdidas por fricción	45
Tabla 4.1: Parámetros físicos y químicos de muestras de lodo	63
Tabla 4.2: Diagrama de producción de lodo en el mes de agosto de 2023 ...	64
Tabla 4.3: Datos de entrada para dimensionamiento de agitador.....	67
Tabla 4.4: Ficha técnica del agitador seleccionado.....	68
Tabla 4.5: Matriz Pugh de equipos de espesamiento	70
Tabla 4.6: Selección de ancho de banda.....	72
Tabla 4.7: Datos técnicos del equipo de espesamiento	72
Tabla 4.8: Balance de flujos en el espesador de gravedad por bandas.....	73
Tabla 4.9: Matriz Pugh de equipos de deshidratación	75
Tabla 4.10: Datos técnicos de equipo deshidratador	77
Tabla 4.11: Valores típicos del fluido al salir de un filtro de bandas.....	78

Tabla 4.12: Balance de flujos en el deshidratador filtro prensa de bandas	79
Tabla 4.13: Características del polímero.....	81
Tabla 4.14: Datos técnicos del agitador seleccionado	85
Tabla 4.15: Principales propiedades del fluido.....	88
Tabla 4.16: Propiedades del sistema de transporte de lodo	88
Tabla 4.17: Análisis de velocidad para cada tubería.....	91
Tabla 4.18: Coeficiente de pérdida para accesorios en la succión	95
Tabla 4.19: Coeficiente de pérdida para accesorios en la descarga.....	97
Tabla 4.20: Valores tabulados para la ecuación del sistema	99
Tabla 4.21: Datos técnicos de bomba de lodos seleccionada	101
Tabla 5.1: Principales parámetros del lodo de Papelera Reyes S.A.C	122
Tabla 5.2: Equipos seleccionados para el sistema de filtrado de lodo	123
Tabla 5.3: Inversión del sistema de filtrado de lodos	130
Tabla 5.4: Consumo de agua industrial con y sin sistema de filtrado.....	131
Tabla 5.5: Proyección ahorro en consumo de agua para 16 meses	132

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ONU: Organización de las Naciones Unidas

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

ITS: Informe Técnico Sustentatorio

ASME: Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos

DAF: Flotación por Aire Disuelto

NPSH: Altura Neta de Aspiración Positiva

ISO: Organización Internacional de Estandarización

ANSI: Instituto Nacional Estadounidense de Estándares

RESUMEN

El presente trabajo de investigación titulado *Diseño de un sistema de filtrado de lodos para optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú. Papelera Reyes S.A.C*, tuvo como objetivo principal diseñar un sistema de filtrado de lodos para mejorar el porcentaje de agua que se está reutilizando (52%) en la producción de papel Tisú dentro de la empresa Papelera Reyes S.A.C, Provincia Constitucional del Callao.

La tesis se clasifica como una investigación de tipo aplicada, de nivel descriptivo, enfoque cuantitativo y un diseño no experimental. Así mismo, se utilizó un método de investigación inductivo – deductivo en donde se siguió una serie de etapas: primero se determinaron las propiedades físico - químicas del lodo residual, así como también la cantidad del lodo rechazado de la PTAR. Luego se dimensionaron los componentes que van a constituir el sistema de filtrado de lodos utilizando textos de diseño y manuales de fabricantes.

Posterior al dimensionamiento de los equipos se obtuvo como resultado la selección del equipo espesador de gravedad mediante bandas en la marca Andritz Group, modelo PDXL-1000-B. Así mismo se seleccionó como equipo deshidratador un filtro prensa de bandas en la marca Andritz Group modelo PPS11-1500-B. Por último en el software Pipe Flow Expert se simuló el transporte del lodo con la bomba centrífuga modelo Hidrostral ISO 2858 - INOX, obteniéndose que el caudal real de lodo a transportar es de 23.4 m³/h.

Al realizar un balance global del agua recuperada en el espesamiento y deshidratación del lodo, se concluye que, de implementarse el sistema de filtrado de lodo en Papelera Reyes S.A.C, el 86.1% del agua que se necesita para producir una tonelada de bobina de papel se obtendrá de agua que se ha tratado en la PTAR. Es decir, la reutilización del agua se ha optimizado en 34.1% comparado con el porcentaje de reutilización inicial (52%).

PALABRAS CLAVE: sistema de filtrado, lodos, reutilización de agua, optimización.

ABSTRACT

The present research work entitled Design of a sludge filtration system to optimize water reuse in the production of Tissue paper. Papelera Reyes S.A.C, had as its main objective to design a sludge filtration system to improve the percentage of water that is being reused (52%) in the production of Tissue paper within the company Papelera Reyes S.A.C, Constitutional Province of Callao.

The thesis is classified as applied research, with a descriptive level, quantitative approach and a non-experimental design. Likewise, an inductive-deductive research method was used where a series of stages were followed: first, the physical-chemical properties of the residual sludge were determined, as well as the amount of sludge rejected from the WWTP. Then the components that will constitute the sludge filtration system were sized using design texts and manufacturers' manuals.

After sizing the equipment, the result was the selection of the Andritz Group brand gravity thickening equipment using belts, model PDXL-1000-B. Likewise, an Andritz Group brand belt filter press, model PPS11-1500-B, was selected as dehydrating equipment. Finally, in the Pipe Flow Expert software, the transport of the sludge was simulated with the Hidrostral ISO 2858 - INOX model centrifugal pump, obtaining that the real flow rate of sludge to be transported is 23.4 m³/h. By carrying out a global balance of the water recovered in the thickening and dehydration of the sludge, it is concluded that, if the sludge filtration system is implemented in Papelera Reyes S.A.C, 86.1% of the water needed to produce a ton of paper reel will be will obtain from water that has been treated in the WWTP. That is, water reuse has been optimized by 34.1% compared to the initial reuse percentage (52%).

KEYWORDS: filtration system, sludge, water reuse, optimization.

INTRODUCCIÓN

El sector papelerero en nuestro país se limita a tres áreas de producción de papeles; los cuáles son: papeles de impresión, papeles marrones o cartones, y los papeles Tisú. Con este último tipo de papel es con el que se fabrican los productos comúnmente llamados papel higiénico, papel toalla, y servilletas.

La empresa Papelera Reyes S.A.C, viene dedicándose desde el año 2003 únicamente a la fabricación y comercialización de los productos derivados del papel Tisú, siendo su marca emblemática “Paracas” y distribuyendo a lo largo del país distintas presentaciones de papel higiénico, papel toalla, entre otros.

Para la fabricación de estos productos, el agua es esencial en grandes volúmenes porque permite desintegrar, limpiar y blanquear la pasta de fibra. También es necesaria para generar energía en el secado y enfriamiento del papel recién formado. Se estima que es necesario entre 15 a 20 litros de agua para producir 1 Kg de cualquier tipo de papel (ONU, 2012).

El agua residual (efluente) proveniente de la fabricación del papel Tisú, y en general, de todo tipo de papel, es conveniente someterla a un tratamiento adecuado porque, una vez “limpia”, permite volver a utilizarla en el proceso de producción. Además, el tratamiento de estos efluentes elimina el impacto ambiental que podría haber causado en el ecosistema de haber enviado este efluente sin procesar al drenaje público. Este tratamiento a los efluentes se obtiene con la implementación de una Planta de Tratamientos de Aguas Residuales (PTAR).

Con esta premisa, Papelera Reyes S.A.C implementó en sus instalaciones una PTAR en el año 2015, lo que le permitió brindar un tratamiento a sus efluentes residuales líquidos y reutilizar el agua tratada en la producción. Se determinó que del total de agua necesaria para producir una tonelada de papel Tisú (14.4 m³), el 52% (7.5 m³) era agua reutilizada y solo el 48% (6.9 m³) se obtenía del suministro de agua exterior (SEDAPAL), esta información se puede encontrar en el informe técnico sustentatorio presentado por la empresa Papelera Reyes S.A.C en el año 2019.

Ahora bien, las impurezas sólidas y líquidas que se han separado del agua residual luego de pasar por la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales se

conocen como lodos. Estos se caracterizan, por lo general, por tener un elevado contenido de agua, entre un 90 a un 98% en peso (Amador y otros, 2020).

Amador et al. (2020) en su artículo *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones*, menciona que al implementar un sistema encargado de filtrar el lodo, puede retirar un gran porcentaje del agua contenida en el mismo. En la tesis de Marín y Villanueva (2023) al implementar un sistema de filtrado de lodos en una PTAR ubicada en el distrito de Santa Clara, Lima; se disminuyó el contenido de agua en el lodo de 85.9% inicial a un porcentaje de humedad de 17.7% a la salida del sistema, aprovechando el agua retirada para otros fines.

Una de las metas a largo plazo que ha establecido la empresa Papelera Reyes S.A.C es depender cada vez menos del agua suministrada por SEDAPAL, por motivos que se detallarán en la sección I.

En este contexto, el presente trabajo de investigación se diseñó un sistema de filtrado de lodo residual en la PTAR de Papelera Reyes S.A.C, con la finalidad de extraer el agua que aún se encuentra en el lodo y optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú.

A continuación, se describirá la distribución del presente proyecto.

En la sección I, se detalló la realidad problemática que originó la propuesta del presente proyecto, en base a esta realidad, se definieron los objetivos y justificación que tiene la investigación.

En la sección II, se presentaron los proyectos y artículos que sirvieron como antecedentes para sentar las bases que tiene la investigación, luego se dio a conocer los conceptos utilizados en el diseño del sistema de filtrado de lodos.

En la sección III, se definieron las hipótesis y variables, dimensiones e indicadores, luego se representaron en una matriz de operacionalización.

En la sección IV, se describió el tipo de metodología a utilizar. Así mismo, en esta sección se desarrolló el diseño del sistema de filtrado.

En la sección V y VI se presentan los resultados y discusión de resultados, respectivamente.

Por último, se muestran las referencias bibliográficas y los anexos.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

Dentro del período de 2019 a 2023, la empresa Papelera Reyes S.A.C ha ejecutado diversas mejoras tecnológicas en su planta, lo que ha generado un aumento de producción en 40% con respecto a la producción de bobinas de papel en el año 2019. En consecuencia, se observó un aumento en el consumo de agua industrial en 45%, según se describe en la Tabla 1.1 extraída del informe técnico sustentatorio presentado por la empresa Papelera Reyes S.A.C (2024).

Tabla 1.1: Promedio mensual en el período 2019 y 2023

PROCESO	PRODUCCIÓN 2019	PRODUCCIÓN 2023
Producción de bobinas de papel (ton/mes)	658.3	921.6
Consumo de agua industrial (m ³ /mes)	4 608	6 359

Fuente: Extraído del informe de Papelera Reyes S.A.C (2024)

La empresa Papelera Reyes S.A.C se abastece de agua proveniente de dos pozos subterráneos con capacidad de almacenar 2000 m³ cada uno. Estos pozos a su vez son abastecidos por SEDAPAL. Cuando se tiene un corte de agua por parte de SEDAPAL, la empresa cuenta con 4000 m³ de agua almacenada, lo que en el 2019 brindaba un periodo de producción continua durante 26 días, sin embargo, con el aumento de producción, este almacén de agua solo durará 18 días de producción continua en caso de un déficit en el suministro de agua. Luego de este corto periodo, se tendría que detener producción (Papelera Reyes S.A.C, 2024).

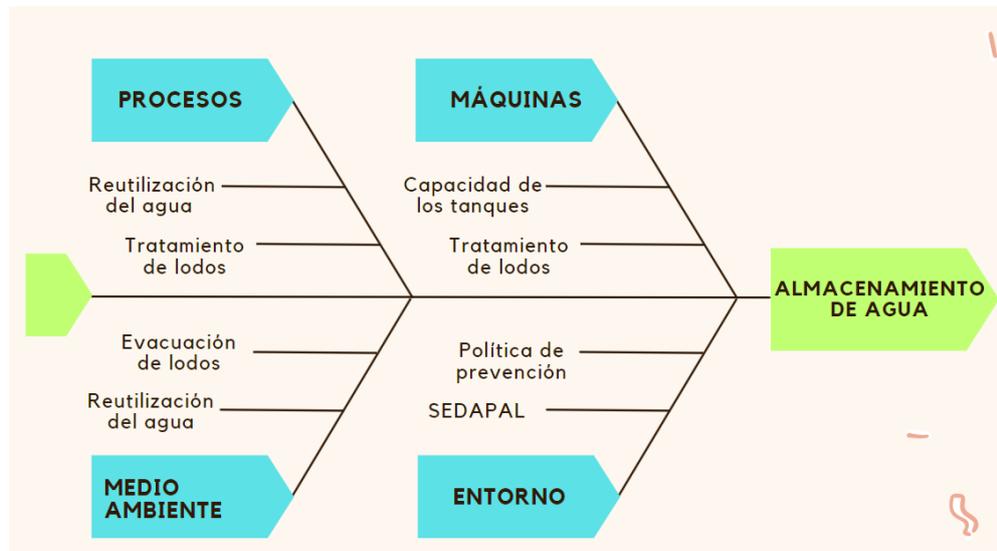
Con esta premisa, el departamento de planificación y desarrollo de Papelera Reyes S.A.C ha establecido como meta a largo plazo, disminuir

la dependencia del agua industrial e incrementar el porcentaje de reutilización de agua.

El porcentaje de reutilización del agua actual es del 52%, es decir, para producir una tonelada de bobina de papel se utiliza 6.9 m³ de agua industrial (conocida también como agua fresca) y 7.5 m³ provienen del agua tratada (conocida también como agua clarificada) en la PTAR, esta información se obtuvo del informe técnico sustentario presentado por Papelera Reyes S.A.C (2024).

La presente investigación diseñará un sistema de filtrado de lodos residuales provenientes de la PTAR, se estima poder incrementar el porcentaje de reutilización del agua de un 52% actual a un 75%, según Amador-Díaz (2020), en su artículo *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones*.

Figura 1.1: Diagrama de Ishikawa



1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Cómo optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo caracterizar y cuantificar el lodo generado en la producción de papel Tisú?
- ¿Cómo dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de filtrado de lodo?
- ¿Cómo simular el transporte de lodo a través del sistema de filtrado?

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de filtrado de lodo para optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C.

1.3.2 Objetivos específicos

- Caracterizar y cuantificar el lodo generado en la producción de papel Tisú.
- Dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de filtrado de lodo.
- Simular el transporte del lodo a través del sistema de filtrado.

1.4. Justificación

1.4.1 Justificación Técnica

De implementarse el diseño del sistema de filtrado de lodos en Papelera Reyes S.A.C, permite a la empresa tener un mayor tiempo de producción en caso de que haya un corte de suministro de agua por parte de SEDAPAL. Con la implementación del sistema de filtrado se comprará a SEDAPAL solo 2 m³ de agua por tonelada de producción de bobina de papel. Es decir, en caso de un corte de suministro de agua, la empresa podrá operar con agua clarificada durante 65 días, esto es 47 días más que sin el sistema de filtrado de lodos.

1.4.2 Justificación Económica

En la empresa donde se desarrolló este proyecto, actualmente se subcontrata el servicio de gestión y evacuación de los lodos residuales. Esta compañía retira el lodo de la planta mediante minicargadores frontales cargándolo en volquetes de capacidad para 20 m³, teniendo que realizar 4 viajes diarios debido al gran volumen que tiene un lodo que no ha sido deshidratado, esta empresa contratada también deberá estabilizar los olores y el proceso de putrefacción del lodo antes de descargarlo en un relleno sanitario. Por el servicio de gestión y evacuación de lodos, la empresa contratada ha estipulado un costo de S/. 40.00 por metro cúbico de lodo.

Con la instalación de la PTAR en el año 2015, se viene generando desde entonces, 5990 m³ de lodo residual por mes, ocasionando un costo de gestión de lodos en S/. 239 616.00 por mes.

Si se implementa el diseño propuesto, reducirá la producción de lodo de 6.5 m³/ton a 2.0 m³/ton de bobina de papel. Con esta mejora, el costo de gestión de lodos se verá disminuido a S/. 36 864.00 mensuales, esto debido a que el costo por metro cúbico de lodo evacuado es de S/. 20.00 cuando se transporta un lodo deshidratado.

1.4.3 Justificación Ambiental

Los lodos que generan las plantas de tratamiento de aguas residuales son dañinos para el ecosistema en el que se vierten, contienen alto contenido de elementos patógenos, además de metales pesados.

El diseño del presente proyecto permite homogenizar y deshidratar el lodo. De esta manera, el lodo deshidratado podrá transportarse y ser depositado en un monorelleno. Así mismo, al implementarse el diseño propuesto, se estaría cumpliendo con lo dispuesto en la Ley N° 27314, Ley General de Residuos Sólidos en donde establece que

“todo lodo generado en una PTAR debe ser estabilizado y deshidratado como requisito para su transporte”. (Ministerio, 2017)

1.5. Delimitantes de la investigación

1.5.1 Delimitante Teórica

La presente investigación se delimitó al empleo de mecánica de fluidos, diseño de elementos de máquinas, uso de manuales de selección de fabricantes, al uso de software de diseño AutoCAD 3D y el software de simulación Pipe Flow Expert. En particular, se utilizó teoría de temas como: selección de bombas, diseño de tuberías, diseño de sistemas de tratamiento de lodos, selección de elementos mecánicos, teoría de la conservación de la masa, entre otros.

También se siguieron las recomendaciones del texto escrito por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) del gobierno de México, titulado *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales: Tratamiento y disposición de lodos.*

1.5.2 Delimitante Temporal

Debido a que se utilizaron registros de la empresa Papelera Reyes S.A.C y también selección de equipos de empresas proveedoras, la investigación está delimitada temporalmente en un periodo de 8 meses, comprendida entre el 01 de octubre de 2023 hasta el 30 de julio de 2024.

1.5.3 Delimitante Espacial

Como delimitante espacial se tuvo las instalaciones internas del área que comprende la fabricación de papel Tisú en la empresa Papelera Reyes S.A.C, ubicada en la avenida Néstor Gambetta 6693, distrito del Callao, provincia constitucional del Callao, Perú.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes:

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Pinzón (2022) en la tesis, *Diseño de una planta de deshidratación y secado de lodos industriales provenientes del proceso de enfriamiento de un horno incinerador de la empresa PROSARC S.A ESP*, menciona que los lodos que produce la empresa PROSARC S.A ESP. en la actualidad es de 94.43% de humedad, lo cual es un porcentaje a considerar, por lo cual conlleva a la empresa a analizar los lodos o residuos químicos, biológicos e industriales para lograr reducir el costo económico y ambiental. Luego del análisis de los lodos se vio en la necesidad de diseñar e implementar los equipos adecuados para deshidratar con eficacia los desechos, para ello deciden usar un filtro de tornillo que tiene un rango de funcionamiento del 95-100% de humedad, logrando reducir el volumen del lodo hacia un 83% dando un reaprovechamiento al agua y al sólido deshidratado, logrando los propósitos de la empresa.

De la Ossa (2022) en la tesis, *Evaluación de alternativas para el aprovechamiento de lodos de destintado generados en una empresa de producción de papel Tisú*, el autor hace mención que se generan importantes cantidades de lodos de destintado y que se puede contribuir con las metas de la empresa tanto en el ámbito económico como ambiental dándole un buen aprovechamiento a los residuos obtenidos. Es por ello que se diseñó una planta de procesos cuyas propiedades de humedad, poder calorífico y tratamiento de lodos sea el idóneo, para lo cual se concluyó que la planta de deshidratación más adecuada debe de tener una capacidad para deshidratar de 140 toneladas diarias. ingresando a la gravity table con una humedad de 98%, luego se dosifica con un polímero deshidratador saliendo de la belt press a 80% de

humedad y dirigiéndose a la prensa de tornillo para terminar el proceso; saliendo de la planta de tratamiento con una humedad de 45%, reaprovechando el agua y volviéndolo a procesar.

Romero (2021) en la tesis *Estandarización de la planta de tratamiento de lodos generados por la planta potabilizadora de Tixán*, menciona que un factor principal que se genera por el lavado de la planta potabilizadora es el porcentaje de humedad que tienen los lodos reciclados; con ese enfoque la empresa busca variar algunos parámetros del diseño de su proceso de deshidratación de lodos para luego estandarizar los procesos y optimizar el recurso del agua; para ello hicieron ensayos con cantidades de caudal y tiempos pequeños ocasionando un menor porcentaje de agua en el lodo ya que anteriormente el proceso de deshidratación arrojaba 57.6% de humedad y luego de los ensayos arrojó un 40% de humedad en el lodo; con ello se logró el propósito dándole un mejor uso al agua filtrada.

Amador y otros (2020) en su artículo *Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones* plantea la problemática relacionada a los lodos sin tratar, debido a que los volúmenes de estos residuos que se generan en las plantas de tratamiento de aguas residuales son en muchos casos, “excesivos”. El objetivo de su trabajo es realizar una valoración sobre los procesos tecnológicos para el manejo de lodos que se aplican para disminuir su impacto ambiental. El autor destaca que entre los métodos más empleados para la estabilización de los lodos se encuentra la deshidratación mecánica. Amador reconoce que al implementar un sistema encargado de filtrar el lodo puede retirar un gran porcentaje del agua contenida en el lodo y reinsertarla en la PTAR. De esta manera el porcentaje de reutilización de agua en la industria puede aumentar entre un 20 a 25% con respecto al inicial.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Marín y Villanueva (2023) en la tesis *Deshidratación de lodo residual a escala piloto en un secador convectivo rotacional, caso: planta de tratamiento de aguas Santa Clara, provincia de Lima, Perú*, tuvo como finalidad mejorar la gestión de lodo residual obtenido en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales; por tal motivo la deshidratación del lodo a escala piloto se realizó mediante un proceso constituido por un secador convectivo de rotación continua, tanque de agitación, tornillo de alimentación, sistema de calentamiento de aire, colector ciclónico y un lavador de gases. Las variables de proceso analizadas fueron las temperaturas del secador (120°C, 150°C y 200°C) y el tiempo de permanencia del lodo dentro del tambor de secado (20, 40, y 60 minutos) respectivamente. La humedad de ingreso al secador es de 85.9% saliendo con un porcentaje de humedad de 17.74%, generando la deposición del agua para otros fines pertinentes en la empresa.

Cornejo (2021) en la tesis *Propuesta de reaprovechamiento de lodos de filtración: Caso planta de tratamiento de agua potable de filtros rápidos de Majes* menciona que para la limpieza de los filtros rápidos en la PTAP del distrito de Majes, departamento de Arequipa; se consume, en las circunstancias más críticas, el 10,28% de la producción promedio de agua tratada. Este lodo residual producto de la limpieza de los filtros está siendo descargado por el desagüe, lo que además de consumir gran porcentaje del agua tratada producida por la PTAP, ocasiona un impacto ambiental significativo y el incumplimiento de la norma de Condiciones Mínimas de Manejo de Lodos que estipula la Ley General de Residuos Sólidos, Ley 27314. Como solución a este problema se evaluó dos posibles alternativas de tratamiento de lodos para su reúso e ingreso a la planta de Majes. La alternativa

con una mejor solución propone reingresar el lodo a la PTAP después que reciba el tratamiento para reducir su turbiedad y presencia de organismos patógenos. Con la implementación de este procedimiento se estará recuperando el 80% del lodo expulsado por los filtros y se evitará el consumo de 105 m³ de coagulante en la producción de agua potable.

Cucho (2019) en su artículo “Reutilización del agua mediante el sistema de deshidratación de lodos (MacTube), en el proyecto Hilarión” nos da el alcance de los estudios previos ya realizados para la recuperación y reutilización del agua en el rubro minero, la mina Hilarión viene presentando éste problema en la extracción de minerales ya que el lodo extraído en la mina contiene gran cantidad del recurso agua; convirtiéndose en el principal problema por la escasez de tal recurso y las implicancias ambientales. Por tanto, se vio en la necesidad de recuperar el agua que se encuentra dentro del lodo, con el fin de reducir su volumen y facilitar su manejo. Por tal motivo se propone la deshidratación del lodo con el uso del sistema de tratamiento denominado MacTube, que tendrá la función principal de filtrar el líquido, reteniendo las partículas sólidas en suspensión, obteniendo un agua clara con una turbidez menor a las señaladas por las disposiciones legales. El MacTube W1 7.10 es una geoforma lineal producida con geotextil, tejido en polipropileno de alta tenacidad, entrelazado en ángulos rectos. Es inerte a la degradación biológica y resistente a ataques químicos; las bocas de entrada son radiales y cocidas al tubo. Durante el proceso de bombeo del lodo se usa algunos polímeros cuya finalidad es separar y aglutinar las partículas sólidas, mejorando la eficiencia de la tecnología y la velocidad de deshidratación. La aplicación del sistema de deshidratación de lodos por medio del MacTube, permite recuperar el agua contenida en el lodo producto de la perforación diamantina en 85%.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR)

Los sistemas de tratamiento de aguas residuales son un conjunto integrado de operaciones y procesos físicos, químicos y biológicos, que se utilizan con la finalidad de depurar las aguas residuales hasta un nivel tal que permita alcanzar la calidad requerida para su disposición final, o su aprovechamiento mediante el reúso. El subproducto que se origina en este proceso, denominado lodo o biosólido, debe ser tratado de manera adecuada para reducir su volumen y carga contaminante antes de ser retirado de la PTAR (Aqua Development Network S.A, 2020).

Lodo o biosólido

El lodo producido en las operaciones y procesos de tratamiento de las aguas residuales suele ser un líquido o líquido semisólido con un contenido en sólidos, dependiendo de las operaciones y procesos de tratamiento, variable entre 0.25 y el 12% en peso. De los constituyentes eliminados en el tratamiento, el lodo es, con diferencia, el de mayor volumen y su tratamiento y evacuación es, quizás el más importante dentro del tratamiento del agua residual debido a las siguientes razones (CONAGUA, 2015).

- El lodo está formado principalmente, por las sustancias responsables del carácter desagradable de las aguas residuales no tratadas.
- Solo una pequeña parte del lodo está compuesta por materia sólida.
- Representa un 50 por ciento de la infraestructura y costo utilizada para dar un tratamiento al agua.

Derivado de lo anterior, el tratamiento de lodo tiene su propia tecnología, legislación y manejo que continuamente se está revisando y evolucionando.

2.2.2 Sistemas de filtrado de lodos

El objetivo principal de un sistema de filtrado de lodos es reducir el contenido de agua y materia orgánica del lodo, además debe acondicionar el lodo para su reutilización o evacuación final. Los principales métodos empleados para el tratamiento y evacuación del lodo se indican en la tabla 2.1.

Tabla 2.1: Función de operaciones en el tratamiento del lodo

Operación	Método de tratamiento	Función
Pretratamiento	Dilaceración Mezclado Almacenamiento	Reducción de tamaño Mezclado Almacenamiento
Espesamiento	Por gravedad Por flotación Por centrifugación Por gravedad en filtros banda	Reducción de volumen
Estabilización	Tratamiento térmico Digestión Anaerobia Compostaje	Estabilización
Acondicionamiento	Acondicionamiento Químico Tratamiento térmico	Acondicionamiento del lodo
Deshidratación	Centrífuga Filtro banda Filtro prensa Eras de secado	Reducción de volumen
Evacuación final	Aplicación al terreno Distribución comercialización A vertedero	y Usos y beneficios

Fuente: CONAGUA (2015)

2.2.3. Procedencia, cantidad y características del lodo

Según el texto *Ingeniería de aguas residuales* de Metcalf y Eddy (2010), para proyectar convenientemente las instalaciones para el tratamiento del lodo, es necesario determinar la procedencia, cantidad y características de los sólidos y del lodo a tratar.

Procedencia

La procedencia del lodo producidos en las plantas de tratamiento varía en función del tipo de planta y del modo de explotación. Las principales fuentes de sólidos y lodo, y los tipos de sólidos y lodos generados, se indican en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Tipo de lodo según procedencia

Operación	Tipo de sólido
Desarenado	Arenas y espumas
Decantación primaria	Lodo primario y espumas
Tanques de aireación	Sólidos suspendidos
Sedimentación secundaria	Lodo secundario y espumas
Instalaciones de tratamiento de lodos	Lodos, compostaje y cenizas

Fuente: CONAGUA (2015)

Características

Para filtrar el lodo generado en las plantas de tratamiento de la manera más eficiente posible, es importante conocer las propiedades físicas y químicas del lodo que se va a procesar, en la tabla 2.3 se muestran las principales propiedades a considerar. Las características varían en función del origen del lodo.

Tabla 2.3: Propiedades físicas y químicas del lodo

Propiedad	Unidades	Descripción
Densidad	Kg/m ³	Masa por unidad de volumen de sólidos. Cuando se expresa la densidad, se debe diferenciar entre la densidad de la muestra y la densidad tomada en campo del lodo apilado o dispuesto o descargado en el relleno.
Sólidos totales	mg/L	Material residual después de la evaporación de una muestra y su subsecuente secado en un horno de 103 a 105 °C a peso constante.
Volumen	m ³	Es el espacio ocupado por los sólidos. Cuando se expresa el volumen, se debe diferenciar entre el volumen de la muestra y el volumen del lodo en condiciones de campo, en el relleno sanitario o apilado.
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	La cantidad de oxígeno requerido para una completa oxidación de una sustancia a dióxido de carbono y agua.
Color		Los sólidos con color se relacionan a la composición y concentraciones de ciertos elementos tales como sulfuros metálicos.
Temperatura	°C	La temperatura de los sólidos y del lodo es importante por su efecto en las reacciones químicas.
Conductividad	mS/m	La conductividad es la habilidad de los sólidos para conducir una corriente eléctrica

Fuente: CONAGUA (2015)

En la tabla 2.4 se incluyen algunos datos típicos de la composición química de lodos. Muchos de los constituyentes químicos incluidos, son de gran importancia a la hora de considerar el diseño del sistema de filtrado.

Tabla 2.4: Valores típicos de lodos en PTAR

Característica	Intervalo	Valor típico
Sólidos totales (ST), %	2.0 – 8.0	5.0
Grasas y aceites (% de ST)	6-30	20
Proteínas (% de ST)	20-30	25
pH	5.0-8.0	6-0
Alcalinidad (mg/L de CaCO)	500-1500	600
Ácidos orgánicos (mg/L)	200-2000	500
Poder calorífico (MJ/kg)	23000-29000	25500

Fuente: CONAGUA (2015)

Cantidad

Metcalf y Eddy (2010) explica que es de esperar que la cantidad diaria de sólidos que entra en una planta de tratamiento varíe dentro de un amplio intervalo de valores. Para asegurar que se dispone de suficiente capacidad para hacer frente a estas variaciones, el proyectista de instalaciones para el tratamiento y evacuación de lodos debe tener en cuenta:

- Las tasas media y punta de producción de lodo.
- La capacidad de almacenamiento potencial de las unidades de tratamiento de la planta.

En el texto nos mencionan que algunos componentes del sistema de filtrado de lodos, tales como las bombas o espesadores de lodo,

pueden tener que ser diseñados basándose en las condiciones de máxima producción mensual.

Según CONAGUA (2015) la producción mensual de lodos se define como el más alto promedio de producción diario de lodos determinado por mes para un periodo anual dado. Se puede usar como criterio de diseño el pico de 30 días, que corresponde al más alto promedio de producción en 30 días.

Las cantidades de lodo se pueden estimar usando datos históricos. Muchas plantas miden los flujos de las corrientes de lodo o los lodos de desecho al medir los cambios de volumen en los tanques de almacenamiento.

2.2.4 Operaciones de pretratamiento

Almacenamiento

De acuerdo a Metcalf y Eddy (2010) el almacenamiento de lodo debe realizarse para laminar las fluctuaciones de la producción de lodo y permitir la acumulación de los mismos durante los periodos en los que las instalaciones de tratamiento subsiguientes se hallan fuera de servicio (problemas externos, turnos noche, fines de semana, y periodos de paro de los equipos no programados). El almacenamiento del lodo es particularmente importante en el caso de los procesos de deshidratación mecánica, para los cuales es importante asegurar que la alimentación se lleve a cabo a caudal constante.

En plantas de grandes dimensiones el lodo se puede almacenar en tanques diseñados para conseguir tiempos de detención de entre varias horas y varios días. Para asegurar la mezcla completa del lodo, puede ser necesario utilizar mezcladores mecánicos.

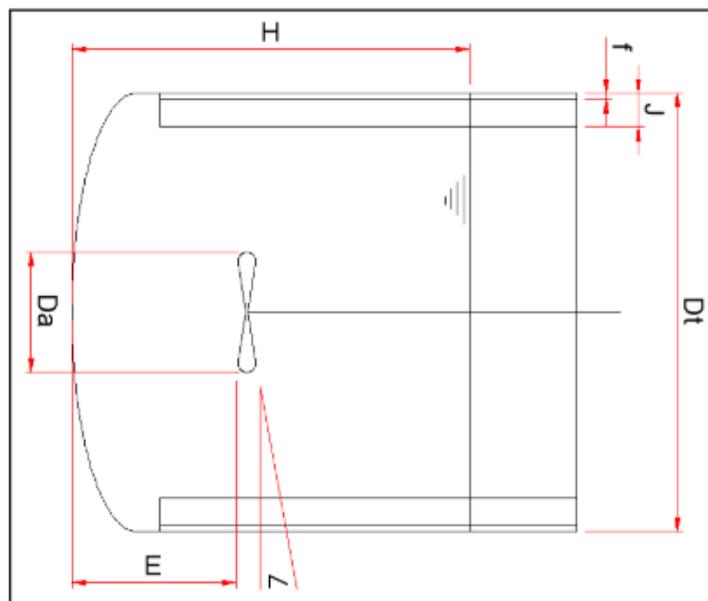
Mezclado

Metcalf y Eddy (2010) menciona que el lodo se genera en los procesos de tratamiento primario, secundario y avanzado. Es necesario mezclar

el lodo proveniente de estos procesos para conseguir que la alimentación a los subsiguientes procesos y operaciones de tratamiento sea un material uniforme. La uniformidad de la mezcla adquiere mayor importancia en el caso de sistemas de corto tiempo de detención, como puede ser el caso de la deshidratación del lodo. Para asegurar un mezclado adecuado, los tanques de mezcla suelen estar equipados con agitadores mecánicos.

Castillo (2013) en su texto *Estudio teórico experimental de la agitación* brinda los siguientes conceptos para dimensionar un agitador mecánico. Para el diseño se utiliza las semejanzas geométricas estandarizadas que relacionan las medidas generales del tanque con el tipo de impulsor.

Figura 2.1: Esquema para dimensionar un agitador mecánico



Fuente: Castillo (2013)

Donde:

$$\frac{H}{Dt} = 1 \quad \text{entonces } Dt = 4\text{m.}$$

$$\frac{Da}{Dt} = 0.33 \quad \text{entonces } Da = 1.32\text{m.}$$

$$\frac{E}{dt} = 0.33 \quad \text{entonces } E = 1.32\text{m.}$$

$$\alpha \leq 25^\circ .$$

$$\frac{J}{Dt} = 0.1 \quad \text{entonces } J = 0.4\text{m}$$

$$\frac{f}{J} = 0.02 \quad \text{entonces } f = 0.008.$$

Además se puede conocer la potencia consumida del agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia. Estos gráficos van a depender de las características geométricas del agitador y de la presencia o no de placas deflectoras.

Número de Reynolds (Re).

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido. Relaciona densidad, viscosidad, velocidad y el flujo. La presencia o ausencia de turbulencia en un fluido que se agita se puede relacionar con un número de Reynolds (Castillo, 2013).

$$Re = \frac{Nxd^2\rho}{\mu} \quad (2.1)$$

Donde:

N = velocidad de rotación [rps]

d = diámetro del agitador [m]

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

μ = viscosidad [kg/m.s]

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar:

Régimen laminar: $Re < 10$

Régimen transitorio: $300 < Re < 10000$

Régimen turbulento: $Re > 10000$

Número de Potencia (Np)

El número de potencia es proporcional a la relación entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia.

$$Np = \frac{P}{N^3 \times d^5 \times \rho} \quad (2.2)$$

Donde:

P = potencia de agitación del impulsor (watts)

N = velocidad de rotación [rps]

d = diámetro del agitador [m]

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

μ = viscosidad [Pa·s]

Consumo de potencia para Reynolds > 100000

En este caso el Np es independiente del Re y la viscosidad no influye.

$$P = KT \times N^3 \times (Da)^5 \times \rho \quad (2.3)$$

Donde:

N = velocidad de rotación [rps]

Da = Diámetro del rodete

ρ = densidad del fluido [kg/m³]

KT = constante de tipo de agitadores de la tabla 2.5.

Tabla 2.5: Valores de KT según tipo de impulsor

Tipo de impulsor	KL	KT
Hélice paso cuadrado, tres palas	41.0	0.32
Hélice paso de 2, tres palas	43.5	1.00
Turbina, seis palas planas	71.0	6.30
Turbina, seis palas curvas	70.0	4.80
Turbina de ventilador, seis palas	70.0	1.65
Turbina dos palas planas	36.5	1.70
Turbina cerrada, seis palas curvas	97.2	1.08

Fuente: Castillo (2013)

2.2.5 Espesamiento

Aqua Development Network S.A (2020) señala que los lodos que se originan en los diferentes tratamientos de una PTAR suelen ser muy líquidos, del orden del 99% de agua, es decir, concentraciones de 1-0.5% de residuo seco, con mucho volumen de lodo en condiciones generalmente muy sépticas.

El espesamiento es un proceso por el cual se pretende aumentar la concentración de los lodos reduciendo su volumen, lo que origina un menor tamaño de los depósitos que se utilizarán en los diferentes procesos para la eliminación o estabilización de los lodos producidos en la línea de lodos.

Según CONAGUA (2015), entre las principales tecnologías utilizadas para el proceso de espesamiento se tiene:

- Espesamiento por gravedad en tanques fijos.
- Espesamiento por gravedad en bandas.
- Espesamiento por flotación con aire disuelto.
- Centrífugas

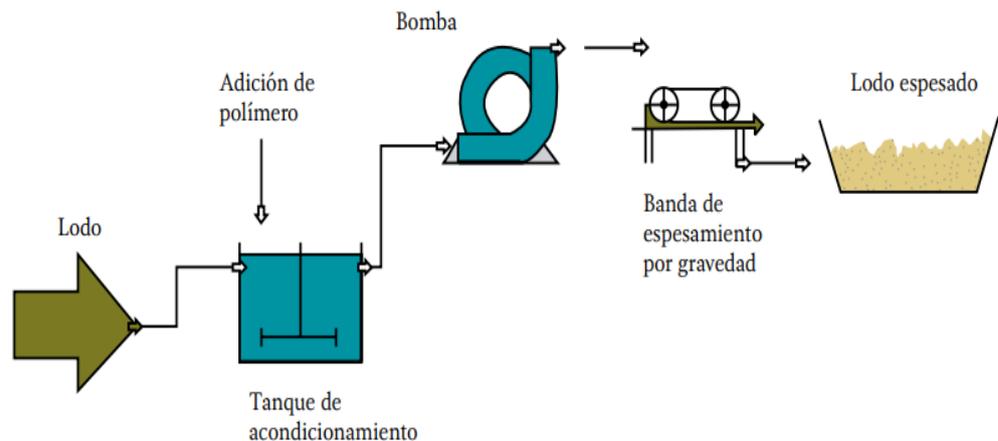
- Espesamiento rotativo

En la tabla 2.6, se muestran las ventajas y desventajas de cada uno de estos métodos.

En la presenta investigación se trabajará con el espesamiento por gravedad en bandas, por lo que pasamos a definirla.

En el espesamiento por gravedad en bandas, el lodo se concentra al liberar agua drenándola por gravedad a través de una banda horizontal. Durante el recorrido sobre la banda, una serie de cuchillas cortan y forman surcos en el lodo, permitiendo que el agua liberada del lodo pase a través de la banda. Una vez eliminado el lodo espesado, la banda pasa por un ciclo de lavado (CONAGUA, 2015).

Figura 2.2: Espesamiento de lodos por gravedad en bandas



Fuente: CONAGUA (2015)

Los espesadores de bandas por gravedad se dimensionan considerando ambos eventos: la carga pico de sólidos y la carga hidráulica pico debido a que se produce un lavado de la banda, por lo que el sistema debe tener la posibilidad de apagarse y reiniciar. Las recomendaciones para la carga de lodo residual del sistema de lodos activados basado en el ancho de la banda se muestran en la tabla 2.7.

Tabla 2.6: Cualidades de principales equipos de espesamiento de lodos

	Ventajas	Desventajas
Espesamiento por gravedad en tanques fijos	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona mayores capacidades de almacenamiento de lodos. • Requiere menos habilidades por parte del operador. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere grandes extensiones de tierra. • Contribuye a la producción de olores. • El porcentaje de separación de sólidos puede ser variable.
Espesamiento por gravedad en bandas	<ul style="list-style-type: none"> • Buena captura de sólidos y una operación confiable. • Ocupa poco espacio en lodos en comparación con otras tecnologías de espesamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Problemas de olores. • Rendimiento variable.
Espesamiento por flotación con aire disuelto	<ul style="list-style-type: none"> • Proporciona mejor separación sólido-liquida que el espesamiento por gravedad. • Menos problemas de olor que un espesador por gravedad. 	<ul style="list-style-type: none"> • El costo de operación es mucho más alto en comparación con los espesadores por gravedad. • Tiene muy poca capacidad de almacenamiento de lodos
Centrífugas	<ul style="list-style-type: none"> • Un alto rendimiento en un área pequeña. • Tiene la capacidad para alcanzar constantemente de 4 a 6 por ciento de sólidos en el lodo espesado 	<ul style="list-style-type: none"> • Puede requerir polímeros con el objetivo de operar con éxito. • Es potencialmente un elemento de alto mantenimiento.
Espesamiento rotativo	<ul style="list-style-type: none"> • Contención de olores. • Pueden tratar lodos. • Filamentosos. • Alta captura de sólidos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto costo en comparación con otros sistemas de espesamiento. • Existe el problema de que se rompan los flóculos y escapen partículas de lodo por el filtrado.

Fuente: Aqua Development Network S.A (2020)

Tabla 2.7: Carga hidráulica y carga de sólidos según tamaño de banda

Tamaño de la banda (ancho efectivo de deshidratación, m)	Carga hidráulica, L/s	Carga de sólidos (Kg/h)
0.5	7.9	255
1.0	15.7	520
1.5	23.6	765
2.0	31.4	1040
3	47.2	1560

Fuente: Aqua Development Network S.A (2020)

Para determinar el ancho de banda, dependiendo de la carga de sólidos, se utiliza la siguiente relación:

$$F_{SST} = Q_{LODOS} \times \partial_{LODO} \times \% SST \quad (2.4)$$

Donde:

F_{SST} = Carga de sólidos en Kgseco/h

Q_{LODOS} = Caudal de lodos en m³/h

∂_{LODO} = Densidad del lodo en Kg/m³

$\% SST$ = Porcentaje de sólidos en el lodo.

2.2.6 Deshidratación

El proceso de deshidratación se trata de una operación física (natural o mecánica) empleada para reducir el contenido de humedad del lodo y su volumen. Este tipo de proceso aumenta el contenido de materia seca del lodo de un 3% a un 40% aproximadamente, y se realiza por alguna o varias de las siguientes razones (Metcalf y Eddy, 2010):

- ✓ Los costes de transporte del lodo por camión hasta el lugar de su evacuación final son notablemente menores cuando se reduce el volumen por deshidratación.
- ✓ El lodo deshidratado es, generalmente, más fácil de manipular que el fango líquido o espesado. En la mayoría de los casos, el lodo deshidratado es susceptible de ser manipulado con tractores dotados de cucharas, palas y con cintas transportadoras.
- ✓ En algunos casos, puede ser necesario eliminar el exceso de humedad para evitar la generación de olores y que el lodo sea putrescible.

Según investigación de los autores de la presente tesis, los equipos de deshidratación más extendidos son los mecánicos por delante de los naturales. Desde el punto de vista económico las tecnologías de deshidratación más utilizadas en la industria se encuentran las centrífugas, filtros de banda, filtro de prensa y tornillo deshidratador. En la tabla 2.8 se muestra la descripción técnica y ventajas – desventajas de los principales equipos deshidratadores utilizados en la actualidad.

Figura 2.3: Principales tecnologías de deshidratación

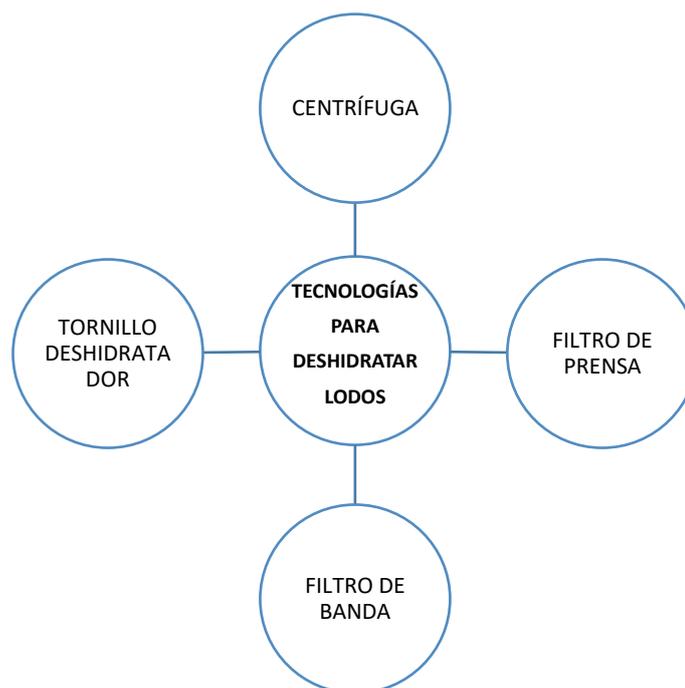


Tabla 2.8: Cualidades de principales equipos de deshidratación de lodos

Tecnología	Descripción técnica	Ventajas / Desventajas
Filtro de placas	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve humedad hasta en un 65%. • Capacidad de producción entre 1.5 a 10kg de sólidos por m² de superficie de filtración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto grado de separación, con muy buena separación de sólidos. • Operación sencilla y fiable. • Equipo de larga vida. <p>Inconvenientes de uso:</p>
Filtro de banda	<ul style="list-style-type: none"> • Admite concentraciones de 1 a 5 % de sólidos. • Elimina la humedad hasta en un 70%. • Rango de capacidades de la alimentación va de 2 a 190 m³/h de lodo. • Tipo de operación: Continua 	<ul style="list-style-type: none"> • Lavado, tracción y centrado de bandas de forma completamente automática. • Operación continua, garantiza un funcionamiento continuo de 24 hrs. <p>Inconvenientes de uso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Alto consumo de productos químicos (floculantes).
Centrífuga	<ul style="list-style-type: none"> • La separación se logra con una fuerza del orden de 1000 a 20000 veces mayor que la gravedad. • Las partículas que caen dentro del campo centrífugo tenderán a moverse hacia afuera en función de la mayor densidad. • Eficiencias entre un 20 y un 50% 	<ul style="list-style-type: none"> • Su estructura compacta y fácilmente adaptable permite dar servicio en lugares poco accesibles. <p>Inconvenientes de uso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uso de gran cantidad de polímero. • Consumo energético elevado. • Mantenimiento especializado.
Tornillo deshidratador	<ul style="list-style-type: none"> • Remueve humedad mayor al 75%. • Debido a sus bajas revoluciones el desgaste es mínimo y es un equipo que puede trabajar las 24 horas sin interrupción. • Vida útil de 15 a 20 años. • Las velocidades van desde 0,1 hasta 1,0 rpm. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil operación y mantenimiento • Operación continua, segura y totalmente automática, con el mínimo estrés de operación. <p>Inconvenientes de uso:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de personal especializado para el mantenimiento del sistema. • Grandes periodos de tiempo en funcionamiento.

Fuente: Metcalf y Eddy (2010)

En la presente investigación se trabajará con el espesamiento por gravedad en bandas, por lo que a continuación se muestran los principales parámetros de diseño.

Carga de sólidos

Para determinar el ancho de banda, dependiendo de la carga de sólidos, se utiliza la siguiente relación:

$$F_{SST} = Q_{ESP} \times \rho_{ESP} \times \% SST \quad (2.5)$$

Donde:

F_{SST} = Carga de sólidos en Kgseco/h

Q_{ESP} = Caudal de lodo espesado en m³/h

ρ_{ESP} = Densidad del lodo espesado en Kg/m³

$\% SST$ = Porcentaje de sólidos en el lodo.

Tasa de sólidos secos

La tasa de sólidos secos aplicada está dentro del rango de 150 a 300 kg/m.h. La máxima carga de sólidos es de 450 kg m⁻¹ h⁻¹. El límite de carga recomendado varía por el fabricante y se debe tener en cuenta se realizan los cálculos del tamaño y la comparación de unidades (CONAGUA, 2015).

$$A_{BANDA} = \frac{F_{SST}}{C_{SÓLIDOS}} \quad (2.6)$$

Donde:

F_{SST} = Carga de sólidos en Kgseco/h

$C_{SÓLIDOS}$ = Tasa de sólidos secos en m³/h

2.2.7 Acondicionamiento químico

Según CONAGUA (2015), el acondicionamiento químico propicia la coagulación de los sólidos y la liberación del agua absorbida en el lodo. El sistema de acondicionamiento se ubica antes de los sistemas mecánicos de deshidratación, tales como centrifugas, filtros prensa de banda y filtros prensa de placas. Los químicos usados incluyen cloruro férrico, cal, aluminio y polímeros orgánicos.

Para Metcalf y Eddy (2010) los polímeros orgánicos son ampliamente utilizados para el acondicionamiento de lodos en la deshidratación mediante filtro de bandas. Están disponibles en forma de polvos secos o líquidos.

En la tabla 2.9 se presentan características de los polímeros orgánicos líquidos y sólidos.

Tabla 2.9: Cualidades de polímeros líquidos y sólidos

Polímeros líquidos	Polímeros sólidos
<ul style="list-style-type: none">- Vida útil de 2 a 6 meses.- Deben protegerse de las variaciones de temperatura en el ambiente durante el almacenamiento.- Requieren amplio espacio de almacenamiento.- Alto costo	<ul style="list-style-type: none">- La vida útil de los polímeros secos es de varios años.- Facilidad de manejo en el almacenamiento.- Requieren poco espacio de almacenamiento.- Bajo costo

Fuente: Metcalf y Eddy (2010)

En la presente tesis se utilizará polímero sólido dado que se asemeja mejor a lo que necesita la planta. Para determinar la cantidad de polímero sólido a dosificar, se recomienda ver la tabla 2.10.

Tabla 2.10: Cantidad de dosificación de polímero

Tipo de lodo	Kilogramos de polímero seco por tonelada de lodo seco
Lodo primario	1.8 – 3.6
Primario + lodo de filtro rociador	1.35 – 4.5
Primario + lodo del sistema de lodos activados (usando aire)	1.8 – 4.5
Lodo del sistema de lodos activados (usando aire)	3.6 – 5.4
Lodo del sistema de lodos activados (usando oxígeno)	3.6 – 5.4
Lodo primario estabilizado anaerobiamente	0.9 – 2.7

Fuente: Metcalf y Eddy (2010)

De acuerdo a CONAGUA (2015), el sistema de acondicionamiento químico de lodos debe contar con instalaciones especiales que incluyen:

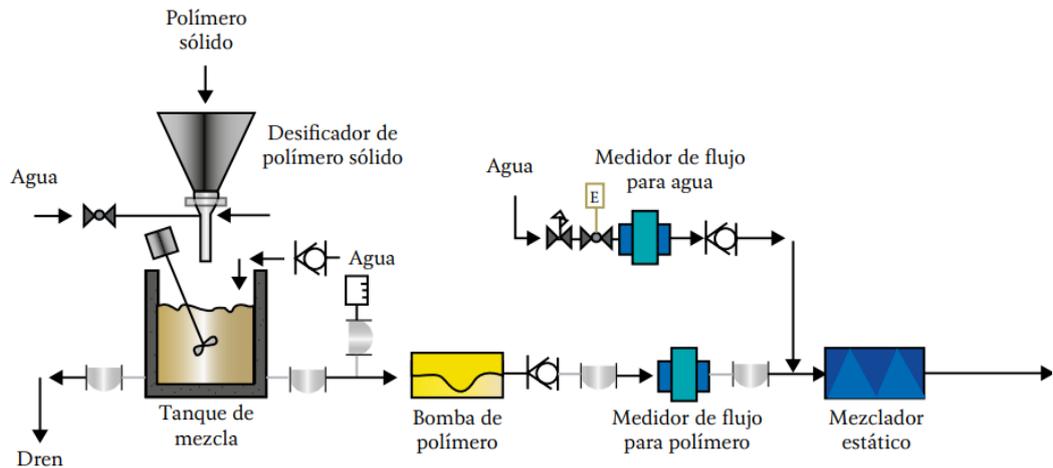
- Almacenamiento del polímero sólido.
- Equipos de dosificación de polímero.
- Bomba para la dosificación del polímero
- Tanques para la preparación y mezclado de las soluciones.
- Sistema de mezclado estático o en línea.
- Tuberías, medidores de flujo, válvulas y accesorios.

Las bombas de dosificación generalmente son de desplazamiento positivo (diafragma, émbolo giratorio o cavidad progresiva). Las transmisiones deberán proporcionar una salida variable. El equipo de mezclado varía dependiendo del químico seleccionado, la viscosidad y las características del lodo.

Los polímeros generalmente se preparan en forma diluida con concentraciones entre 0.25 y 0.50 por ciento en peso. Se requiere agua limpia para dilución, conectada a la descarga del tanque de mezclado;

para diluir aún más la solución de polímeros (hasta 0.05 por ciento en peso, de acuerdo a indicaciones del fabricante); y para lograr una dispersión completa del polímero en el lodo.

Figura 2.4: Sistema dosificador de polímero habitual



Fuente: CONAGUA (2015)

2.2.8 Transporte del lodo

Según Grundfos (2021) el desplazamiento de fluidos, líquidos o gases se desarrolla normalmente en sistemas de flujo, más o menos largos y complejos que implican conducciones rectas, generalmente cilíndricas de diámetros variados, enlazadas por uniones convenientes, curvaturas, codos, válvulas, etc. La cuantía de la energía que deberá suministrarse a un fluido para conseguir su desplazamiento por un sistema determinado dependerá de su caudal, de la altura a que deba elevarse, de la presión con que se requiera al final de su recorrido, de las longitudes y diámetros de los tramos rectos de conducción, de los accidentes intercalados entre ellos y de sus propiedades físicas, fundamentalmente su viscosidad y su densidad.

De Grundfos (2021) el lodo es un fluido no Newtoniano, voluminoso, de aspecto gelatinoso, agua al 90%, sulfato de aluminio, arcilla o arena, coloides, residuos de reactivos inorgánicos, materia orgánica e inorgánica; generando bajo PH natural, fácilmente sedimentable generando dificultad al desplazamiento del agua.

A continuación se describirá los principales conceptos a tener en cuenta para el correcto dimensionamiento de un sistema de transporte de lodos.

Balance de energía

Según Cengel (2010), si se considera un sistema de tuberías por donde se está transportando un fluido, llamamos 1 al punto inicial y 2 al punto final; entonces la energía en ambos puntos está determinada por:

$$\frac{P_1}{\gamma_L} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + H_B = \frac{P_2}{\gamma_L} + Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_T \quad (2.7)$$

Donde:

P_1 y P_2 = Presión manométrica en los puntos 1 y 2.

Z_1 y Z_2 = Coordenadas verticales de los puntos 1 y 2.

V_1 y V_2 = Velocidad del fluido en los puntos 1 y 2.

H_B = Energía por unidad de peso proporcionada por la bomba.

h_T = Pérdida de energía por unidad de peso de fluido en el sistema.

γ_L = Peso específico del lodo.

Además, si se despeja H_B se puede obtener la energía que requiere el sistema para poder transportar el fluido del punto 1 al punto 2.

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_L} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_T \quad (2.8)$$

Donde:

$$H_E = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_L} \right) + (Z_2 - Z_1) = \text{Se le denomina carga estática.}$$

$$H_D = \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) = \text{Se le denomina carga dinámica.}$$

h_T = Pérdidas por fricción.

Pérdidas de carga por fricción

De acuerdo a Cengel (2010), las pérdidas de energía debido a fricción se puede presentar en tuberías y en accesorios

$$h_T = h_L + h_A \quad (2.9)$$

Donde:

h_T = Pérdidas por fricción.

h_L = Pérdidas por tramos rectos en tuberías.

h_A = Pérdidas por accesorios.

Pérdidas por tramos rectos en tuberías, h_L

Por la ecuación de Hazen – Williams:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V_o^2}{2g} \quad (2.10)$$

Dependiendo del tipo de flujo (laminar o turbulento) el factor de fricción de Darcy se determinará de la siguiente manera:

- Flujo laminar

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.11)$$

- Flujo turbulento (ecuación de Colebrook)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3.71 \times D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (2.12)$$

Donde:

f = Factor de fricción.

L = Longitud de tubería recta

D = Diámetro en la tubería de succión.

V_o = Velocidad de operación del fluido.

k = Coeficiente de rugosidad de Darcy (m)

g = Aceleración de gravedad (m/s^2)

Re = Número de Reynolds (adimensional)

Además, se consideran los siguientes valores de rugosidad de Darcy de acuerdo a la tabla 2.11.

Tabla 2.11: Valores de rugosidad de Darcy

Acero al carbono	$k = 0.00015 \text{ m}$
Acero inoxidable	$k = 0.000085 \text{ m}$
HDPE poliuretano	$k = 0.00007 \text{ m}$
Goma o caucho natural	$k = 0.0001 \text{ m}$

Fuente: Grundfos (2021)

Número de Reynolds

El tipo de flujo (laminar o turbulento) se determina con la ecuación adimensional que relaciona las principales propiedades del fluido, denominado Número de Reynolds (Cengel, 2010).

$$Re = \frac{D \times V_o \times \rho_L}{\mu_L} \quad (2.13)$$

Donde:

D = Diámetro interior de la tubería.

V_o = Velocidad de operación del lodo.

ρ_L = Densidad del lodo.

μ_L = Viscosidad dinámica del lodo.

Si:

$Re < 2000$: Flujo laminar.

$Re > 4000$: Flujo turbulento.

$2000 \leq Re \leq 4000$: Flujo transitorio (entre laminar y turbulento).

Pérdidas por accesorios

Las pérdidas por fricción en accesorios como válvulas, codos, uniones, está determinada por la ecuación 2.14.

$$h_A = \sum K \cdot \frac{V_o^2}{2g} \quad (2.14)$$

Donde:

h_A = Pérdida de carga por fricción en accesorios.

V_o = Velocidad de operación del fluido.

K = Coeficiente de pérdida en accesorio.

g = Aceleración de gravedad (m/s^2).

Donde K corresponde al coeficiente de pérdida por fricción de cada accesorio presente en el sistema. En la tabla 2.12 se presenta un resumen de los valores de coeficientes de pérdidas por fricción de fluidos newtonianos, para válvulas y accesorios. En los anexos N° 8 y 9 se presentan los demás coeficientes.

Tabla 2.12: Coeficientes de pérdidas por fricción

Codo 90° R/D > 3 - 5	K = 0.45
Codo 45° R/D > 1	K = 0.20
Codo 22.5° R/D > 1	K = 0.15
Entrada a 90° con T	K = 1.0
Salida a 90° con T	K = 1.3
Descarga tanque	K = 1.0

Fuente: Grundfos (2021)

Velocidad crítica de sedimentación, V_S

Según Grundfos (2021), la velocidad máxima recomendada para el transporte de lodos primarios es de 2.0 m/s, esto con la finalidad de evitar un desgaste prematuro en la tubería por abrasión de los sólidos en suspensión. Además, la velocidad del fluido debe ser al menos 10% mayor a la velocidad crítica de sedimentación (V_S) debido a que si la velocidad del lodo en la tubería de impulsión es demasiado baja, los lodos y la arena tienen tiempo de depositarse, lo que aumenta el riesgo de atascos. En ese sentido, es necesario calcular la velocidad de sedimentación con la ecuación 2.15.

$$V_S = 1.25 \times F_L \times \sqrt[4]{2g \times \left(\frac{D_i}{1000}\right) \times \left(\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1\right)} \quad (2.15)$$

Donde:

V_S = Velocidad de sedimentación (m/s)

F_L = Parámetro en función de la magnitud de la concentración de sólidos (ver figura 2.5)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

D_i = Diámetro interior de la tubería (m)

ρ_S = Densidad de los sólidos en el fluido (Kg/m^3)

ρ_L = Densidad del fluido (Kg/m^3)

La velocidad de operación del fluido para cada tubería debe cumplir:

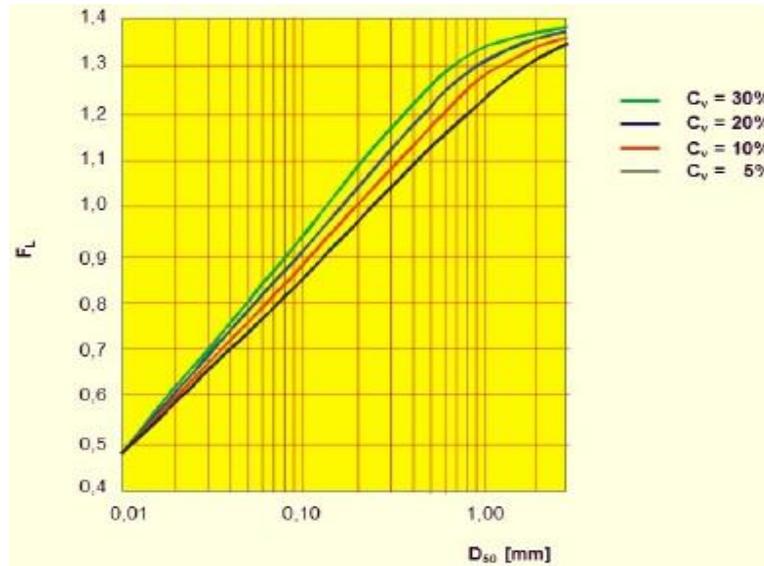
$$V_{mín} < V_O < 2.0 \text{ m/s} \quad (2.16)$$

Donde:

$V_{mín}$ = Velocidad mínima recomendada, 10% mayor V_D .

V_O = Velocidad de operación del fluido

Figura 2.5: Parámetro F_L en función a la carga de sólidos



Fuente: Grundfos (2021)

Cálculo del factor de corrección para el transporte de lodos

De acuerdo a Grundfos (2021), a la energía requerida para el transporte de lodos calculada en la ecuación 2.8 se le debe aplicar un factor de corrección para obtener la curva característica de operación para el transporte de lodos, pues las pérdidas de carga para lodo en cada componente son del 10 al 25% mayores que para el transporte de agua.

Para lo cual, a continuación se muestra el factor de corrección, denominado “heat radio” (H.R):

$$H.R = 1 - 0.11 \times C_p (S_s - 1)^{0.64} \times \ln \frac{d_{50}}{22.7} \quad (2.17)$$

Donde:

$H.R$ = Factor de corrección en el H_B para lodos, adimensional.

C_p = Concentración de sólidos en peso (%).

S_s = Densidad relativa del lodo, adimensional.

d_{50} = Tamaño medio de la distribución de partículas.

2.2.9 Lodo de industria papelera

El lodo papelerero es un residuo industrial producto del tratamiento de las aguas residuales provenientes de la fabricación del papel y se caracteriza por contener principalmente agua, materia orgánica e inorgánica, representadas en fibra de celulosas de longitud variable (Garnica, 2013).

El proceso de fabricación de papel produce un lodo residual, el cual es el producto final del proceso de tratamiento de aguas residuales en las estaciones de tratamiento de aguas residuales. Luego del proceso de tratamiento de las aguas residuales, se generan lodos, los cuales consisten en pequeñas fibras de celulosa, con una alta concentración de materiales pesados, tintas, cargas minerales, materiales inorgánicos como el caolín, la arcilla y el carbonato cálcico (Garnica, 2013).

2.2.11 Clarificación

El agua residual que sale de la etapa de espesado contiene fibras residuales del proceso y es bombeada a las unidades de clarificación por flotación con aire disuelto (DAF), En los clarificadores se separa la fibra del agua con la adición de un coagulante y de un floculante. El agua clarificada es retornada al proceso y el rechazo es bombeado al tanque de lodos.

La mezcla resultante de los rechazos de los clarificadores y de la tinta separada previamente en la celda de destintado, se le conoce como lodo de destintado (De La Ossa, 2022).

2.2.12 Software Pipe Flow Expert V7.40

De acuerdo a la página web de Pipe Flow (2024), este es un software muy útil para el diseño y análisis de redes de tuberías complejas donde los flujos y presiones deben ser equilibrados para resolver el cálculo hidráulico del sistema.

Pipe Flow Expert está diseñado para ayudar a los ingenieros a analizar y resolver una amplia gama de problemas en los que hay que

determinar el flujo y la pérdida de presión a través de una red de tuberías. El Software Pipe Flow Experto le permitirá dibujar un sistema de tuberías complejas y analizar las características del sistema cuando el flujo se está produciendo.

2.2.13 Plataforma Pump-Flo

Según la página web Capterra (2024), PUMP-FLO es un portal de selección hidráulica que cuenta con más de 24 000 distribuidores y 400 000 usuarios registrados. Es un portal de selección de bombas hidráulicas que respalda todos los aspectos del ciclo de vida de las bombas, desde el desarrollo conceptual hasta el diseño y la planificación de las instalaciones, la instalación, las pruebas y el mantenimiento.

2.2.14 Matriz Pugh

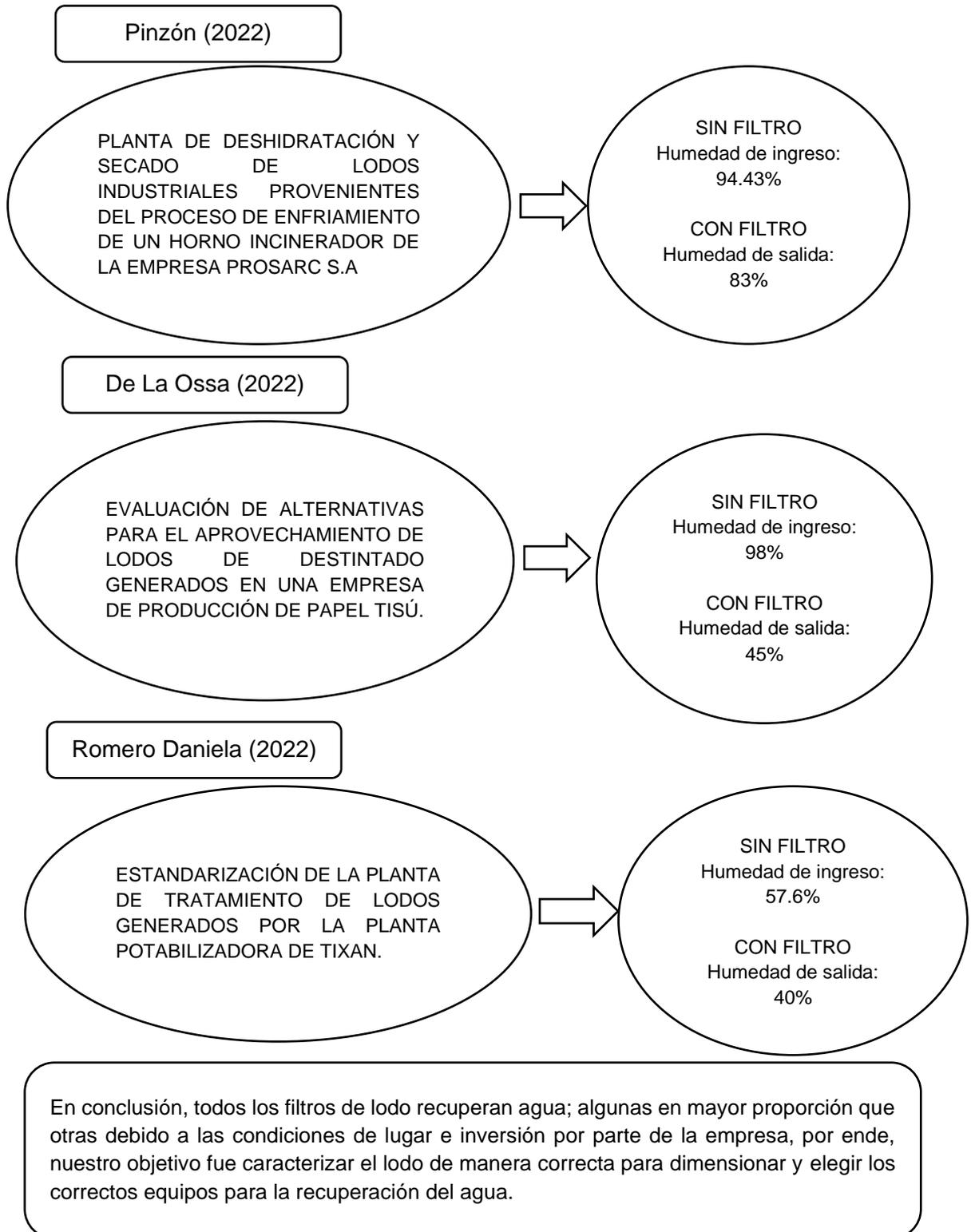
De acuerdo a Rodríguez (2001), la matriz Pugh es una herramienta de decisión de carácter cuantitativo que sirve para analizar múltiples alternativas entre sí en base a distintos criterios para evaluar, estos criterios son básicamente las necesidades del cliente. Por lo general, se ubican como filas de la matriz.

El mecanismo bajo el cual se rige la siguiente matriz es designando un valor a cada uno de los criterios de la siguiente forma: se toma la primera alternativa de diseño y se analiza criterio por criterio con el fin de evaluar si su cumplimiento es superior, inferior o igual. Si es superior se coloca un signo «+», si es inferior un signo «-» y si es igual un «0». Para mayor comodidad, se suelen utilizar los números +1, -1 y 0.

2.2 Marco conceptual

Para el marco conceptual elaboraremos los siguientes esquemas para conseguir nuevos constructos para la investigación.

Figura 2.6: Conclusiones importantes de investigaciones referenciales



2.3 Definición de términos básicos

- **Agitador:** Fluido que por medios mecánicos adquiere un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. Crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva de vez en cuando al agitador (FluidMix, 2024).
- **Agua Residual**

Se puede definir el agua residual como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales y comerciales, a los que pueden agregarse eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales (Metcalf y Eddy, 2010).
- **Clarificación del agua**

La clarificación del agua es un procedimiento que precisamente remueve la turbiedad y el color del agua eliminando las partículas finas presentes en el líquido. Generalmente los procesos de clarificación se aplican después de procesos biológicos para el tratamiento de aguas residuales o procesos físico – químicos (CONAGUA, 2015).
- **DAF**

DAF son las iniciales de Flotación por Aire Disuelto. La tecnología DAF es un proceso de clarificación de efluentes para la separación de sólidos grasas y aceites. El sistema ayuda a concentrar el lodo, eliminando una amplia gama de sólidos suspendidos en efluentes, principalmente aceite y grasas, reduciendo además la DQO y la DBO (Metcalf y Eddy, 2010).
- **Diseño**

El diseño es el proceso de configuración mental preliminar, que precede a la búsqueda de soluciones para que un producto resulte útil y atractivo. Se aplica habitualmente en el contexto de la industria, ingeniería,

arquitectura, comunicación, marketing, moda y otras disciplinas que requieren creatividad (Pinzón, 2022).

- **HIDROSTAL:** Es el fabricante de bombas centrífugas más grande del Perú y una de las más importantes de Sudamérica, distinguiéndose por su dedicada labor a la investigación y desarrollo de tecnología vinculada al bombeo de sólidos en suspensión (HIDROSTAL, 2024).
- **ITS**
ITS son las iniciales de Informe Técnico Sustentatorio. Es el instrumento de gestión ambiental que sirve para realizar modificaciones menores que generen impactos no significativos al ambiente o que involucren mejoras tecnológicas en las operaciones (Papelera Reyes, 2024).
- **Lodos residuales**
Un lodo residual es un residuo producido por una PTAR. Contiene materias minerales y orgánicas. Su composición puede variar en función del modo de tratamiento de los efluentes y según el sector en el que se utilice el agua (Garnica, 2013).
- **NPSH**
Corresponde a las siglas en inglés de Net Positive Suction Head, que podemos traducir al español como altura neta positiva de aspiración. El NPSH es la presión que debe existir a la succión de la bomba para que esta tenga una buena alimentación y así evitar que se tengan problemas de cavitación (Grundfos, 2021).
- **Optimización**
La optimización es la disciplina que adapta continuamente los procesos con el fin de mejorarlos. Para eso, se debe hacer un análisis y, así, identificar los puntos deficientes y encontrar las soluciones para perfeccionarlos (De la Ossa, 2022).

- **Papel Tisú**

El papel Tisú es un papel fino absorbente hecho de pulpa de celulosa. Se destaca por su bajo gramaje y por poseer una textura consistente que le confiere suavidad y capacidad de absorción. Se suele fabricar en varias capas como el papel higiénico, papel cocina, servilletas o pañuelos de papel (De la Ossa, 2022).

- **Polímero**

Los polímeros son macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas (conocidas como monómeros) que se repiten a lo largo de toda la cadena. Los polímeros nos rodean en nuestro día a día. Por ejemplo, el poliuretano es uno de los polímeros más versátiles y se utiliza desde en material deportivo, zapatos o bañadores hasta para construir grandes estructuras de ingeniería (Wide Tec, 2019).

- **PTAR**

PTAR son las iniciales de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales. Se refiere a un espacio físico, equipado y destinado para la realización de procesos químicos físicos y biológicos que eliminan los contaminantes presentes en el agua residual (Cisneros y Saucedo, 2016).

- **Reutilización del agua**

Incrementar el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas que anteriormente ha tenido un uso doméstico o industrial. (Cisneros y Saucedo, 2016).

- **Sistema**

Se entiende por un sistema a un conjunto ordenado de componentes relacionados entre sí, ya se trate de elementos materiales conceptuales, dotado de una estructura, una composición y un entorno particulares (Romero, 2021).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

El diseño de un sistema de filtrado de lodos en base a manuales técnicos, procedimientos estandarizados y software de ingeniería, optimiza la reutilización de agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C.

3.1.2 Hipótesis Específicas

H1: Utilizando ensayos estandarizados y datos logísticos, se caracteriza y cuantifica el lodo generado en la producción de papel Tisú.

H2: La elaboración de cálculos de diseño y selección en base a manuales técnicos, permite el dimensionamiento y selección de los componentes del sistema de filtrado de lodo.

H3: El cálculo hidráulico con el software Pipe Flow Expert V7.40 simula el transporte del lodo a través del sistema de filtrado.

3.2. Operacionalización de variable

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ÍNDICES	MÉTODO Y TÉCNICA
VARIABLE I Diseño de un sistema de filtrado de lodo	Proceso de creación de un conjunto de elementos electromecánicos interrelacionados entre sí para retirar el agua y sólidos del efluente proveniente de una planta de tratamiento de agua (Rodríguez, 2013).	Tomando en cuenta las características y cantidad del lodo proveniente de la PTAR, se realizan los cálculos para el dimensionamiento y selección de los elementos del sistema. Luego se simula en conjunto para garantizar el correcto diseño del sistema de filtrado.	Características y cantidad del lodo Dimensionamiento, selección Simulación	<ul style="list-style-type: none"> Propiedades físicas y químicas Caudal Capacidad de las máquinas Red de tuberías 	<ul style="list-style-type: none"> Valores tomados del informe de laboratorio. Valor tomado en caudalímetro magnético Ficha técnica de características Plano de distribución 	<p>Técnica: Documental</p> <p>Instrumentos: Textos de ingeniería, Manual de equipos, Software Pipe Flow Expert</p>
VARIABLE II Reutilización del agua	Incrementar el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas que anteriormente ha tenido un uso doméstico o industrial. (Cisneros y Saucedo, 2016)	Con la simulación del sistema de filtrado de lodo, se tiene un nuevo flujo de lodo. Con este nuevo flujo, se determina el caudal real de agua tratada en el sistema.	Flujo de agua tratada	<ul style="list-style-type: none"> Caudal de agua clarificada 	<ul style="list-style-type: none"> Volumen de agua clarificada / Volumen de agua utilizada 	<p>Técnica: Documental</p> <p>Instrumento: Registros contables, Software Microsoft Excel</p>

IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

4.1 Diseño metodológico

Según Niño (2011), para realizar una investigación se debe tener un plan que cubra todo el proceso de investigación, desde que se delimita el tema y se formula el problema, hasta cuando se determinan, las técnicas, instrumentos y criterios de análisis.

En ese sentido, en la presente sección se va definir el tipo, enfoque y diseño de nuestra investigación.

4.1.1 Tipo de investigación

De acuerdo al autor Nicomedes (2018) en su artículo *Tipos de Investigación*, una investigación Aplicada formula hipótesis de trabajo para resolver los problemas de la vida productiva de la sociedad en base a investigación básica, pura o fundamental de las ciencias fácticas o formales.

En este caso, se tuvo la necesidad de optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú, para lo cual se resolvió el problema diseñando un sistema de filtrado de lodo y se verificó aplicando las ciencias básicas. Es por este motivo que la investigación está en concordancia con el autor Nicomedes y califica como una Investigación Aplicada.

4.1.2 Enfoque de la investigación

Una investigación con enfoque cuantitativo, como su nombre mismo lo indica tiene que ver con la “cantidad” y, por tanto, su medio principal es la medición y el cálculo. En general busca medir variables con referencia a magnitudes. (Niño, 2011).

Con esta premisa, se consideró que la presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se midieron y calcularon variables para garantizar la optimización de reutilización del agua en la producción de papel Tisú.

4.1.3 Nivel de investigación

Arias (2012), en su libro *El Proyecto de Investigación* describe que una investigación descriptiva es aquella donde la misión es observar y cuantificar la modificación de una o más características de un grupo, sin establecer relaciones entre estas. Es decir, cada variable se analiza de forma independiente.

Bajo la premisa anteriormente mencionada, el presente proyecto de investigación alcanza un nivel descriptivo, ya que no se relacionaron variables, solo se limitó a describir el diseño del sistema de filtrado de lodos y luego se obtuvo en cuánto optimizó la reutilización del agua.

4.1.4 Diseño de la investigación

El autor Hernández (2014), menciona en su artículo que una investigación no experimental es aquella que se realiza sin manipular deliberadamente variables. Es decir, es una investigación donde no se varía intencionalmente las variables independientes. Lo que se hace es observar fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos.

En la presente investigación se tiene como variable I: Diseño del sistema de filtrado de lodos y variable II: Reutilización del agua, las cuales no se manipularon intencionalmente, solo se observó que, diseñando un sistema de filtrado de lodos permite optimizar la reutilización del agua en la producción de Papelera Reyes S.A.C. Por lo tanto, el diseño de la investigación fue no experimental.

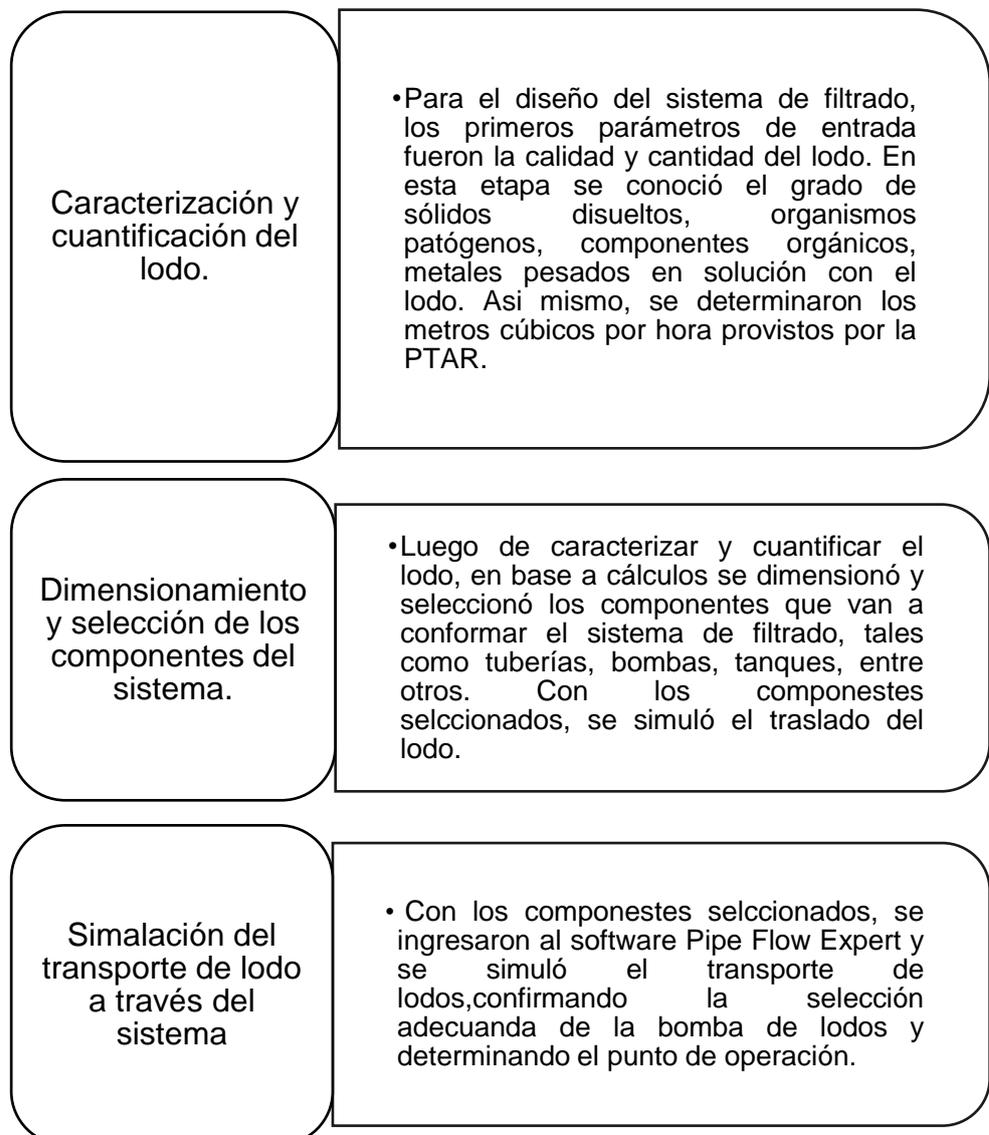
4.2. Método de investigación.

El método de investigación utilizado es el inductivo – deductivo porque se establecieron generalizaciones a partir de lo común visto en los antecedentes, esta generalización estableció que diseñando un sistema de filtrado de lodos en base a textos de ingeniería y manuales de fabricantes permite aumentar el agua procesada en la PTAR, lo que a su vez conlleva

optimizar el porcentaje de reutilización de agua en una determinada industria (Rodríguez, 2013).

Tomando como punto de partida esta generalización se aplicó dicha inducción en la industria papelera, en particular la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C. Para lo cual se utilizó el proceso mostrado en la figura 4.1.

Figura 4.1: Método de investigación



4.3. Población y muestra

Según Hernández (2014), población es aquel conjunto de individuos que tienen las características de las variables en estudio.

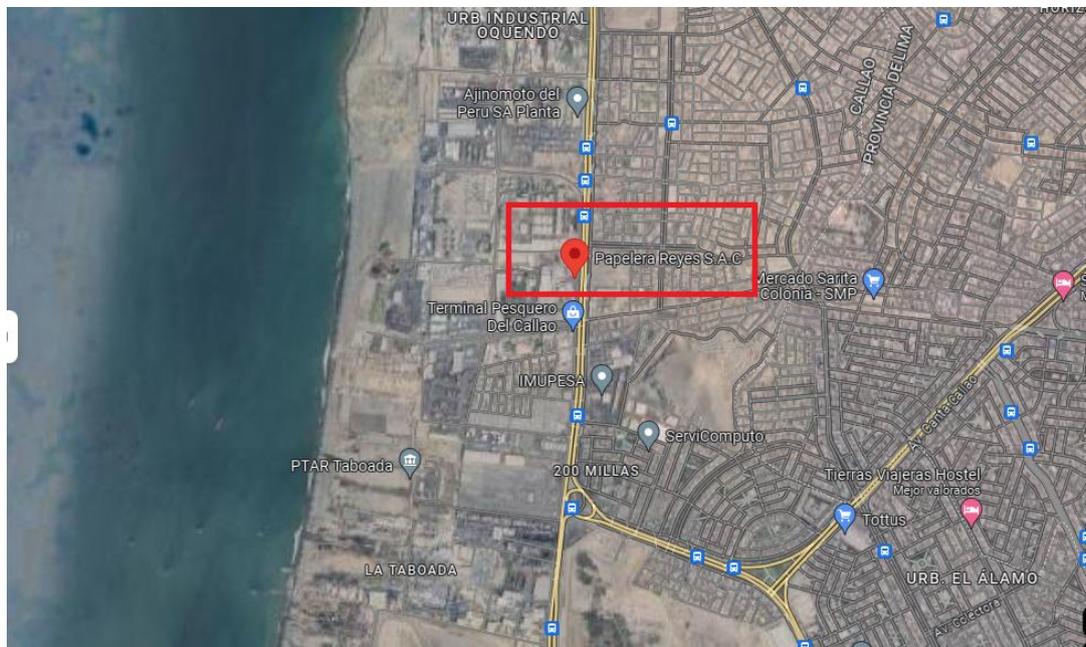
El mismo autor menciona que la muestra es la parte de la población que se selecciona, de la cual realmente se obtiene la información para el desarrollo del estudio y sobre la cual se efectuarán la medición y la observación de las variables objeto de estudio.

En este sentido, como la investigación es de tipo documental, no se tiene población ni muestra.

4.4. Lugar de estudio.

El área de estudio se encuentra ubicado en la Av. Néstor Gambetta N° 6693, distrito del Callao, provincia del Callao y departamento de Lima; en el periodo de tiempo comprendido entre octubre de 2023 y julio de 2024.

Figura 4.2: Lugar de estudio



Fuente: Papelera Reyes, 2024

4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.

4.5.1 Técnicas

De acuerdo con Arias (2012), se entenderá por técnica de investigación, el procedimiento o forma particular de obtener datos o información.

Entre las principales técnicas de recolección de datos se tiene la observación, el análisis documental y análisis de contenido.

En el presente trabajo de investigación la técnica que se utilizó fue el análisis documental, ya que se revisó tesis, libros, revistas y artículos para la recolección de información necesaria.

4.5.2 Instrumentos

Con el nombre genérico de instrumentos de acopio de datos se denomina a todos los instrumentos que pueden servir para medir las variables, recopilar información con respecto a ellas o simplemente observar su comportamiento (Mejía, 2005).

En la recolección de datos de nuestro proyecto se utilizaron como instrumentos:

- ✓ Fichas técnicas de las máquinas.
- ✓ Computadoras e internet.
- ✓ Software Pipe Flow Expert V7.40.
- ✓ Informes de estudio ambiental.
- ✓ Informes económicos de la reutilización del agua residual.
- ✓ Manuales de las máquinas.

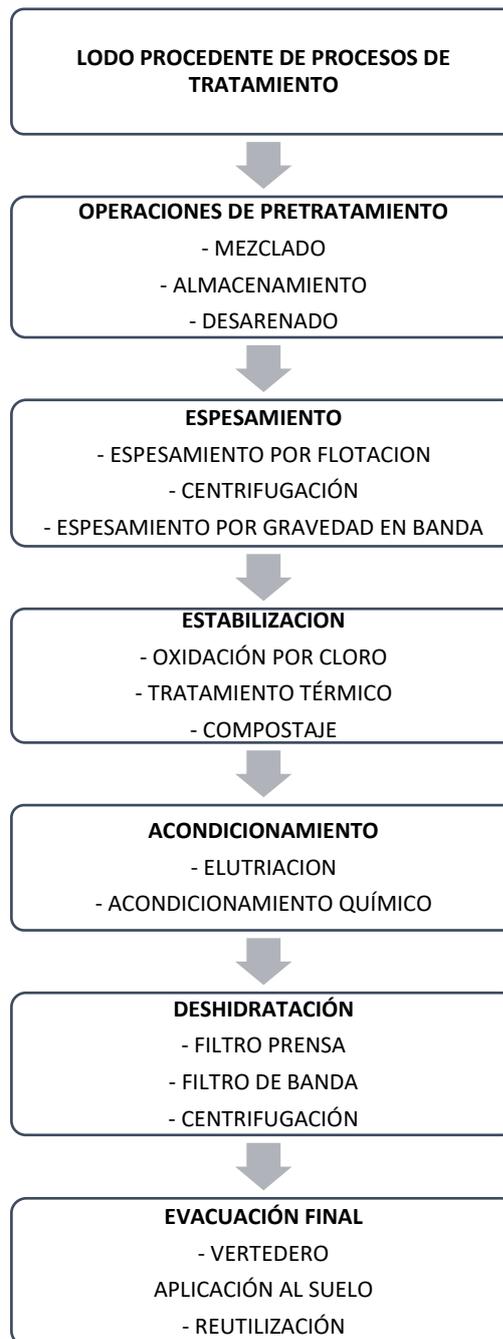
4.6. Análisis y procesamiento de datos.

En esta sección se describe las etapas realizadas para el diseño de un sistema de filtrado de lodo que optimice la reutilización del agua en la producción de papel de Tisú en Papelera Reyes S.A.C, las cuáles se han dividido en tres: caracterización y cuantificación del lodo, dimensionamiento y selección de los componentes del sistema y simulación del transporte de lodo a través del sistema.

Diseño del sistema de filtrado de lodos

Con la intención de brindar un panorama a los lectores, se presenta en la figura 4.3 un diagrama general de los distintos procesos y operaciones unitarias que conlleva un sistema de filtrado de lodos según el texto Ingeniería de Aguas Residuales de Metcalf y Eddy (2010). Se utilizó este diagrama como hoja de ruta para el diseño del sistema de filtrado.

Figura 4.3: Hoja de ruta para diseñar un sistema de filtrado de lodo



Fuente: Metcalf y Eddy (2010)

4.6.1 Caracterización y cuantificación (Procedencia del lodo)

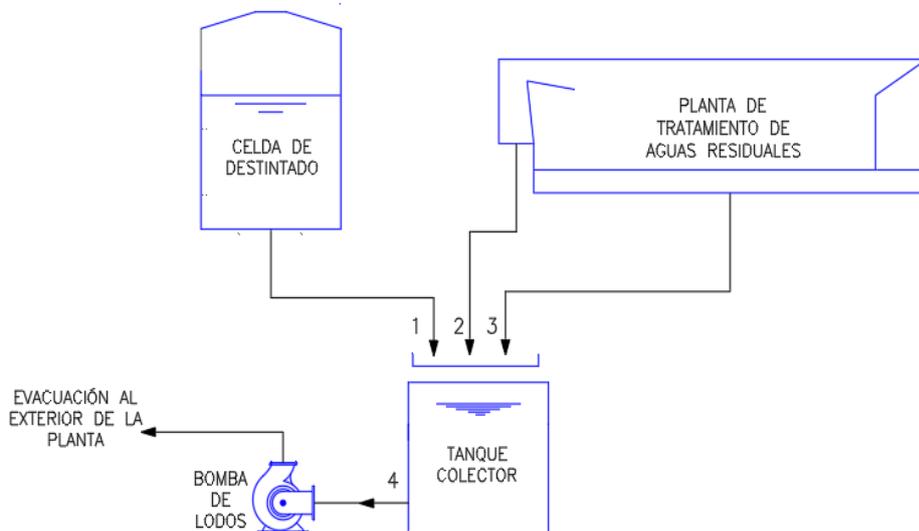
La empresa Papelera Reyes S.A.C actualmente cuenta con una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR). En base a las características y cantidad del efluente que se generan en los procesos de producción de bobinas de papel, se determinó que el tratamiento más óptimo es el que nos brinda un sistema de flotación por aire disuelto, este sistema, también conocido como DAF es el principal generador de lodo residual.

Por otro lado, la planta de producción requiere un proceso que se conoce como destintado, en el cual se utiliza agua para el lavado de la materia prima reciclada. El efluente de este proceso no es conveniente enviarlo a la PTAR debido a su alto contenido de sólidos disueltos, por lo que se clasifica como lodo y se envía directamente al tanque colector de lodos.

Estas son nuestras principales fuentes de lodo, las cuáles se almacenan en un tanque denominado “Tanque colector de lodos” y desde donde se evacuan al exterior de la planta con camiones cisterna de una empresa contratista.

El presente proyecto de investigación propuso diseñar un sistema de filtrado de estos lodos, para lo cual fue necesario conocer las características y cantidad de lodo en el punto 4 de la figura 4.4.

Figura 4.4: Fuentes generadoras de lodo residual



- **Caracterización del lodo**

Para dimensionar y posteriormente seleccionar los componentes del sistema de filtrado de lodo fue necesario caracterizar el tipo de lodo que se va a tratar, es decir, analizar su clasificación, procedencia, grado de corrosión, entre otras características.

Para esta etapa de la investigación, se tomaron 4 muestras en diferentes horas del día con la intención de obtener un promedio de las propiedades físico-químicas a la salida del tanque de lodos.

En la toma de muestras y posterior análisis se tuvo la colaboración del laboratorio Hidrolab S.A.C, los cuales realizan el servicio de muestreo y análisis de residuos sólidos y líquidos.

Los parámetros del lodo que se describirán en la tabla 4.1, fueron evaluados según los métodos estándar para examinación del agua y agua residual, identificados con los siguientes códigos:

- DQO 5220 D. Método Reflujo Calorimétrico cerrado
- SST 2540 D. Secados entre 103°C – 105°C
- Turbidez 2130 B. Método Nefelométrico
- Grasas y Aceites 5520 D. Método de Extracción Soxhlet

De este análisis, las características necesarias para el dimensionamiento de los componentes se encuentran descritas en la Tabla 4.1. En el anexo N° 4, se presenta el informe de Papelera Reyes S.A.C, en donde se explican con mayor detalle los datos brindados por Hidrolab S.A.C en su informe de laboratorio.

Tabla 4.1: Parámetros físicos y químicos de muestras de lodo

PARÁMETRO	MUESTRAS				PROMEDIO
HUMEDAD (% en masa)	98.54	98.64	99.03	97.79	98.5
DENSIDAD (Kg/m³)	1010	1025	1015	1030	1020
SOLIDOS TOTALES (%m)	1.42	1.62	1.51	1.48	1.50
VISCOSIDAD (Kg/m.s)	0.0025	0.0008	0.0015	0.002	0.0017

Fuente: Informe de Laboratorio Hidrolab S.A.C, Anexo N° 4 (2024)

- **Cuantificación del lodo**

Para diseñar el sistema de filtrado de lodo y dimensionar sus componentes, es necesario definir el caudal de ingreso al tanque de lodos. Es decir, se necesita conocer el flujo volumétrico rechazado de la PTAR y del proceso de destintado en la producción.

Para este fin, es necesario tener datos dentro de un periodo extenso ya que la producción de lodos no es constante y es importante dimensionar los equipos del sistema de filtrado con la capacidad de procesar el lodo en los momentos de mayor producción de estos.

Para esto, se tomaron los datos del área de logística, de donde se obtuvo la cantidad de lodo evacuado por la empresa contratista encargada de la gestión de lodos en los días del mes de agosto de 2023, esta información se presenta en la tabla 4.2.

Se tiene que en el día 18 se evacuó la mayor cantidad de lodos, por lo cual este será nuestro punto de referencia para dimensionar el sistema de filtrado.

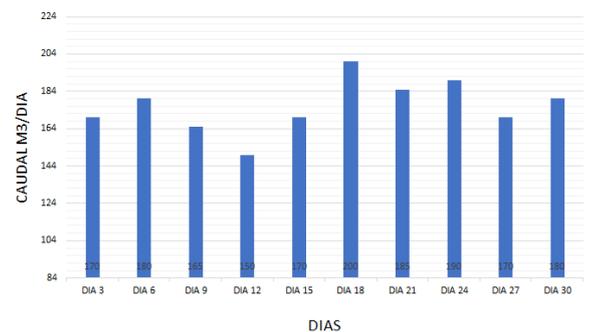
$$Q_{LODOS} = 200 \text{ m}^3/\text{día}$$

Tabla 4.2: Diagrama de producción de lodo en el mes de agosto de 2023

Día de Agosto	Caudal (m ³ /día)
3	170
6	180
9	165
12	150
15	170
18	200
21	185
24	190
27	170
30	180

Fuente: Papelera Reyes S.A.C (2024)

Figura 4.5: Diagrama de producción de lodo en el mes de agosto de 2023



Fuente: Papelera Reyes S.A.C (2024)

4.6.2. Dimensionamiento y selección de los componentes

a) Operaciones de pretratamiento

Para conseguir que el lodo proveniente de la PTAR y del proceso de destintado ingrese de forma constante y homogénea al sistema de filtrado, es necesario almacenar y mezclar el lodo. La mezcla y almacenamiento se puede llevar a cabo en una única unidad diseñada para cumplir ambas funciones colocando un tanque y un agitador mecánico dentro del mismo. Para esto, es necesario primero dimensionar el tanque de almacenamiento para luego dimensionar un agitador acorde al tanque.

• Dimensionamiento del tanque de lodos

Para dimensionar el tanque de lodos debemos definir la operatividad del sistema de filtrado, según CONAGUA (2015), es conveniente programar las operaciones de deshidratación durante el turno día ya que el lodo deshidratado tiene que ser transportado fuera de planta para cumplir con los estándares ambientales.

Si bien la PTAR de Papelera Reyes S.A.C opera las 24 horas todos los días de la semana acorde con la producción de bobinas de papel, se propuso que la planta de tratamiento de lodos trabaje durante el día 8 horas diarias. Esto para no ocasionar problemas logísticos en el transporte del lodo fuera de planta por parte de empresas contratadas.

- Días de operación = 7 días/sem
- Horas de operación = 8 h/día

Ya que el caudal de alimentación al tanque colector de lodos es de $200 \text{ m}^3/\text{día}$, y el sistema de filtrado de lodos solo va operar 8 horas al día. El tanque de lodos debe tener la capacidad de almacenar durante 16 horas.

$$Q_{L.PTAR} = 200 \text{ m}^3/\text{día} = 8.33 \text{ m}^3/\text{h}$$

El volumen necesario debe ser:

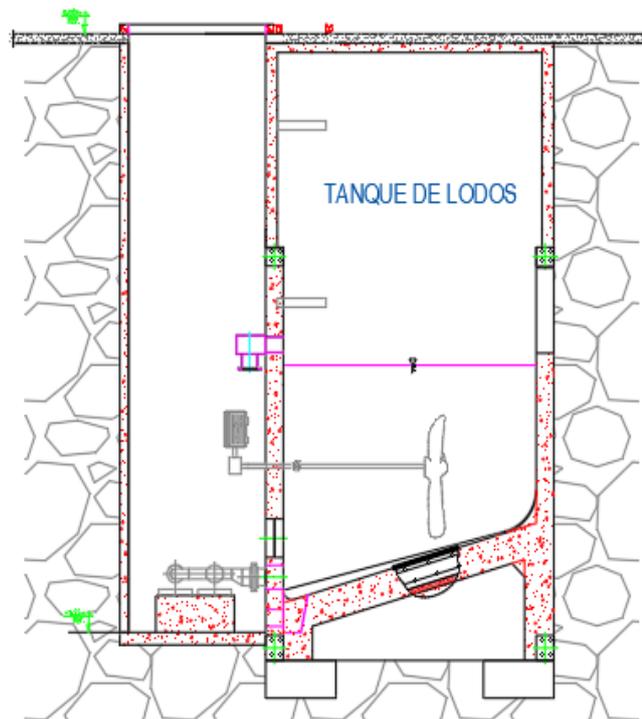
$$V = Q_{L.PTAR} \times T_m = 8.33 \times 16$$

$$V = 133.2 \text{ m}^3$$

Actualmente, la gestión de lodos en la empresa Papelera Reyes S.A.C lo realiza una empresa tercera, la cual retira el lodo de la planta mediante una bomba y camiones cisterna. En este tipo de evacuación también es necesario tener un equipo de almacenaje y mezclado para evitar la sedimentación del lodo en el fondo del tanque.

Es por ello, que en la actualidad la empresa cuenta con un tanque de lodos y un mezclador mecánico como se muestra en la figura 4.6.

Figura 4.6: Tanque de lodos existente



Fuente: Papelera Reyes S.A.C, 2024

Según las dimensiones de este tanque, 5.0 x 4.9 x 7.6m, su capacidad de almacenamiento es de 187 m³, por lo que para nuestro propósito cuenta con el volumen requerido de almacenamiento.

- **Dimensionamiento del agitador**

Se desarrolló el dimensionamiento y selección del agitador en función de la teoría expuesta en la sección 2 para el diseño de agitadores. Los datos de entrada se encuentran indicados en tabla 4.3, cabe recalcar que la empresa ya cuenta con un agitador mecánico instalado en el tanque recolector de lodos, lo que se realizó fue verificar que sea el indicado para el sistema de filtrado.

Tabla 4.3: Datos de entrada para dimensionamiento de agitador

Fluido a agitar	Lodo primario de PTAR
Densidad del fluido	1.02 g/cm ³ = 1020kg/m ³
Temperatura de trabajo	20C°
Diámetro del tanque	4 m
Altura del tanque	5 m
Forma de la tapa del tanque	Curva
Viscosidad	0.017 kg/m.s
Altura del lodo	4
Volumen de llenado	128m ³

Actualmente se cuenta con un agitador de paletas hélice que consta de 3 palas de forma helicoidal que se utiliza para líquidos de baja viscosidad y para velocidades que pueden ser medias o altas.

Para la selección del motor, éste debe trabajar a velocidades medias con el fin de reducir el consumo de potencia. Como velocidad media para una turbina pueden estar entre 100 a 300 rpm.

Se usó la velocidad promedio para ver los cambios en el fluido, por ende, la velocidad es de 170 rpm o 2.833rev/seg.

Considerando el medio húmedo al cual estará expuesto el agitador y su conjunto, se define utilizar acero inoxidable del tipo 314 o 316 L (cromo-níquel-molibdeno) en la parte interior y para la parte exterior acero al carbono previamente galvanizado.

Para el dimensionamiento se utilizó la semejanza geométrica estandarizada que relaciona el diámetro del tanque con el diámetro del impulsor.

$$\frac{D_i}{D_t} = 0.33$$

Donde:

D_i = Diámetro del impulsor

D_t = Diámetro del tanque de lodos o lado de menor longitud.

Reemplazando valores:

$$D_i = 1.32 \text{ m}$$

Se determina el número de Reynolds con la relación 2.13:

$$Re = \frac{N x d^2 x \rho}{\mu} = \frac{2.833 x 1.32^2 x 1020}{0.017}$$

$$Re = 296173 \text{ } \langle \rangle \text{ } 2.9 x 10^5$$

Se conoce que, para $Re > 100000$ el consumo de potencia de un agitador de 3 palas esta dado por la relación 4.1:

$$P = K_T x N^3 x (D_i)^5 x \rho \quad (4.1)$$

Donde, según la tabla 2.5 para un tipo de impulsor de 3 palas, el valor de K_t es 0.32. Reemplazando valores:

$$P = 0.32 x 2.83^2 x 1.32^5 x 1020 = 29741.3 \text{ W}$$

$$P = 29.7 \text{ Kw } \langle \rangle \text{ } 39.9 \text{ HP}$$

Entonces según los parámetros obtenidos, el agitador que se está usando cumple con las especificaciones determinadas, y sus datos técnicos se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Ficha técnica del agitador seleccionado

Serie	HPS - Horizontal
Volumen	10 - 500m ³
Velocidad	100 - 300 rpm
Potencia	1.5 – 45 kW
Tipo de alabe	Helicoidal tipo S
Diámetro de hélice	200-1500mm
Longitud máxima del eje	2000mm

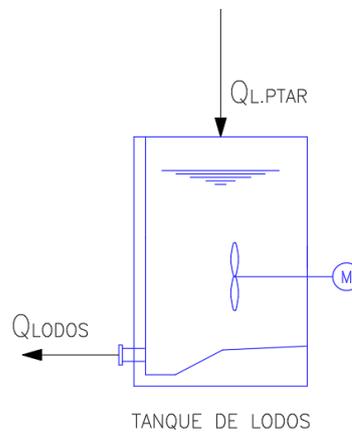
Fuente: FluidMix, 2024

b) Espesamiento

Una vez seleccionado el tanque y agitador, perteneciente al proceso de pretratamiento de un sistema de filtrado de lodos, corresponde dimensionar y seleccionar el equipo de espesamiento.

Para ello, primero es necesario definir el caudal a tratar en el sistema de filtrado de lodos, el cual será mayor al que provee la PTAR debido a que este sistema trabajará menos tiempo y tendrá que procesar $200\text{m}^3/\text{día}$ en solo 8 horas.

Figura 4.7: Balance de flujos en el tanque de lodos



Cálculo del caudal de lodos a tratar por la planta de tratamiento de lodos:

$$Q_{L.DOS} = \frac{Q_{L.PTAR}}{HRS_{OPER}} = \frac{200 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{8 \frac{\text{h}}{\text{día}}} \quad (4.2)$$

$$Q_{L.DOS} = 25.0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Los componentes del sistema de la planta de tratamiento de lodos, se seleccionarán teniendo en cuenta el caudal de $25.0 \text{ m}^3/\text{h}$.

Conociendo el caudal que pasará por el sistema de filtrado, podemos dimensionar el equipo de espesamiento pero antes veremos qué tipo de equipo se utilizará.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la tabla 2.6 en donde se muestra en una tabla las ventajas y desventajas que tienen los diferentes equipos de espesamiento comerciales, se procede a utilizar la herramienta de análisis y toma de decisiones denominada Matriz Pugh.

En base al objetivo principal, el cual busca el porcentaje más alto de remoción de humedad utilizando la menor inversión, considerando un área de planta disponible de 120 m² (10x12) y sin tener mayor relevancia la remoción de agentes biológicos; los criterios de decisión son:

- Remoción de humedad
- Ventajas de funcionamiento
- Viabilidad económica
- Disponibilidad de espacio

Tabla 4.5: Matriz Pugh de equipos de espesamiento

CRITERIOS	Gravedad por tanques fijos	Gravedad en bandas	Por aire disuelto	Centrífugas	Espesamiento rotativo
Remoción de humedad	-1	+1	-1	-1	+1
Ventajas de funcionamiento	-1	+1	-1	0	0
Viabilidad económica	+1	-1	+1	+1	0
Disponibilidad de espacio	0	+1	0	0	0
Suma +	1	3	1	1	+1
Suma -	2	1	2	1	0
Suma general	-1	2	-1	0	1

Nota: +1, cuando supera lo establecido en el criterio.

-1, cuando no cumple con lo establecido en el criterio.

0, cuando es igual a lo establecido en el criterio.

Por lo tanto, tomando el equipo de espesamiento con mayor puntaje según los criterios de selección de la tabla 4.5, se decide utilizar el espesamiento por gravedad en bandas.

Para dimensionar el espesador por gravedad en bandas, se utilizó el criterio de CONAGUA (2015) en su libro Manual, tratamiento y disposición de lodos, donde los parámetros de selección son la carga de sólidos y la carga hidráulica.

Se conoce que:

$$Q_{LODOS} = 25.0 \frac{m^3}{h}$$

$$SST_{LODOS} = 1.5 \%$$

$$\rho_{LODO} = 1020 \frac{kg}{m^3}$$

Se obtiene el flujo de sólidos secos en kgseco/h:

$$F_{SST} = Q_{LODOS} \times \rho_{LODO} \times \% SST \quad (4.3)$$

$$F_{SST} = 25.0 \frac{m^3}{h} \times 1020 \frac{kg}{m^3} \times 0.015$$

$$F_{SST} = 382.5 \frac{kgseco}{h}$$

A su vez se determina la carga hidráulica en L/s:

$$Q_{LODOS} = 25.0 \frac{m^3}{h} \times \frac{1000 L}{1 m^3} \times \frac{1 h}{3600 s}$$

$$Q_{LODOS} = 6.94 \frac{L}{s}$$

Con la carga hidráulica y flujo de sólidos secos se ingresa a la tabla de selección provista por CONAGUA (2015).

Tabla 4.6: Selección de ancho de banda

Ancho de banda, metros	Carga hidráulica, L s ⁻¹	Carga de sólidos, (kg h ⁻¹)
0.5	7.9	255
1	15.7	520
1.5	23.6	765
2	31.4	1 040
3	47.2	1 560

Fuente: CONAGUA (2015)

De la tabla se obtiene que el ancho de la banda de espesamiento a seleccionar debe ser de 1m, con capacidad hidráulica de 15.7 L/s y 520 kg/h de capacidad de carga de sólidos.

El proveedor principal de equipos de filtrado de lodos Andritz Group recomienda una serie de mesas gravitatorias considerando la carga de sólidos secos y el ancho de banda.

En base a esto, se seleccionó el siguiente equipo:

Tabla 4.7: Datos técnicos del equipo de espesamiento

Modelo	PDXL-1000-B
Ancho de banda	1000 mm
Velocidad de banda	4.1 – 15.1 m/min
Dimensiones	4725 x 2855 x 1370 mm
Caudal	15 – 35 m ³ /h
%SST espesado	3 - 4 %

Fuente: Andritz Group (2023)

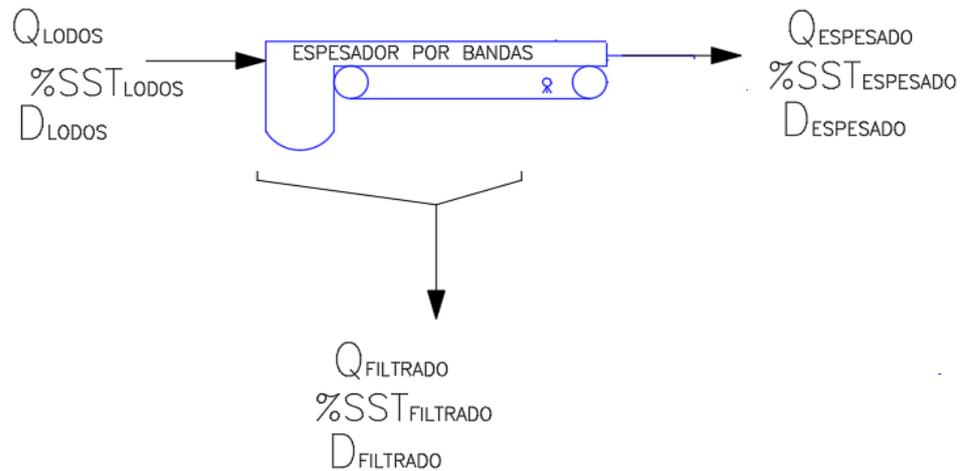
Figura 4.8: Equipo de espesamiento de gravedad por bandas



Fuente: Andritz Group (2023)

Ahora se realizará el balance de masas para determinar el caudal de filtrado y caudal de lodo espesado a la salida de la mesa de gravedad por bandas.

Figura 4.9: Balance de flujos en el espesador de gravedad por bandas



Según CONAGUA (2015), se pueden definir los siguientes valores en base a valores típicos del fluido al salir de un equipo de espesado:

- $D_{\text{ESPESADO}} = 1040 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $D_{\text{FILTRADO}} = 1010 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- $\%SST_{\text{FILTRADO}} = 0.09 \%$

Sintetizamos en la tabla 4.8:

Tabla 4.8: Balance de flujos en el espesador de gravedad por bandas

	Lodos	Espesado	Filtrado
Caudal (Q)	25 m ³ /h	Se desea hallar	Se desea hallar
Sólidos totales (%SST)	1.5%	3.5%	0.09 %
Densidad (D)	1020 kg/m ³	1040 kg/m ³	1010 kg/m ³

Balance de masa de sólidos en la entrada y salida del equipo de espesamiento.

$$Q_L \times D_L \times \%SST_L = Q_{ESP} \times D_{ESP} \times \%SST_{ESP} + Q_{FIL} \times D_{FIL} \times \%SST_{FIL} \quad (4.4)$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.4 se obtiene:

$$382.5 = 36.4 Q_{ESP} + 0.909 Q_{FIL} \quad (4.5)$$

Balance de flujo volumétrico en la entrada y salida del equipo de espesamiento.

$$Q_L = Q_{ESP} + Q_{FIL} \quad (4.6)$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.6 se obtiene:

$$25 = Q_{ESPESADO} + Q_{FILTRADO} \quad (4.7)$$

Resolviendo las ecuaciones (4.5) y (4.7) se obtiene:

$$Q_{ESPESADO} = 10.14 \frac{m^3}{h}$$

$$Q_{FILTRADO} = 14.86 \frac{m^3}{h}$$

Luego de seleccionar el espesador de gravedad por bandas, y guiándonos de la figura 4.3, se debe continuar dimensionando el equipo de deshidratación.

c) Deshidratación

Conociendo el caudal de lodo espesado que se enviará al equipo de deshidratación podemos dimensionar el equipo deshidratador pero antes veremos qué tipo de equipo se utilizará.

Teniendo en cuenta lo expuesto en la tabla 2.8 en donde se expone en una tabla las ventajas y desventajas que tienen los diferentes equipos deshidratadores comerciales, se procede a utilizar la herramienta de análisis y toma de decisiones denominada Matriz Pugh.

En base al objetivo principal, el cual busca el porcentaje más alto de remoción de humedad utilizando la menor inversión, considerando un área de planta disponible de 120 m² (10x12) y sin tener mayor relevancia la remoción de agentes biológicos; los criterios de decisión son:

- Remoción de humedad mayor al 65%
- Ventajas de funcionamiento
- Viabilidad económica
- Disponibilidad de espacio

Tabla 4.9: Matriz Pugh de equipos de deshidratación

CRITERIOS	Filtro de prensa	Filtro de bandas	Centrífuga	Tornillo deshidratador
Remoción de humedad	0	+1	-1	-1
Ventajas de funcionamiento	+1	+1	+1	+1
Viabilidad económica	-1	+1	-1	0
Disponibilidad de espacio	+1	+1	+1	+1
Suma +	2	4	2	2
Suma -	1	0	2	1
Suma general	1	4	0	1

Nota: +1, cuando supera lo establecido en el criterio.
-1, cuando no cumple con lo establecido en el criterio.
0, cuando es igual a lo establecido en el criterio.

Por lo tanto, tomando el equipo deshidratador con mayor puntaje según los criterios de selección de la tabla 4.9, se decide utilizar el filtro prensa por medio de bandas.

Para dimensionar el filtro prensa de bandas, se utilizó el criterio de CONAGUA (2015) en su libro Manual, tratamiento y disposición de lodos, donde los parámetros de selección son la carga de sólidos y el ancho de la banda.

Se conoce que:

$$Q_{ESPESADO} = 10.14 \frac{m^3}{h}$$

$$\%SST_{ESPESADO} = 3.5 \%$$

$$\partial_{ESPESADO} = 1040 \frac{kg}{m^3}$$

En los filtros prensa de bandas comerciales la tasa de sólidos secos que pueden procesar está dentro del rango de 150 a 300 kg/m.h. La máxima carga de sólidos es de 450 kg/m.h. Es por ello que se definió la carga de sólidos secos en:

$$C_{SÓLIDOS} = 300 \frac{kgseco}{m.h}$$

Luego que definimos los datos de entrada, se obtiene el flujo de sólidos secos a tratar en Kgseco/h.

$$F_{SST} = Q_{ESPESADO} \times \partial_{ESPESADO} \times \% SST_{ESPESADO} \quad (4.8)$$

$$F_{SST} = 10.14 \frac{m^3}{h} \times 1040 \frac{kg}{m^3} \times 0.035$$

$$F_{SST} = 367.0 \frac{kgseco}{h}$$

A continuación, se calcula el tamaño del filtro de prensa de bandas en términos del ancho de banda:

$$A_{BANDA} = \frac{F_{SST}}{C_{SÓLIDOS}} \quad (4.9)$$

$$A_{BANDA} = \frac{367.0 \frac{kgseco}{h}}{300 \frac{kgseco}{m.h}}$$

$$A_{BANDA} = 1.23 \text{ m}$$

De acuerdo al resultado, se debe seleccionar un filtro de bandas de 1.5m de ancho de banda y que tenga capacidad para tratar 300 kgseco/m.h, además se recomienda tener uno del mismo tamaño o ya instalado disponible para su utilización.

De los catálogos del proveedor Andritz Group, principal fabricante de deshidratadores mecánicos para lodos, se seleccionó el filtro de banda siguiente:

Tabla 4.10: Datos técnicos de equipo deshidratador

Modelo	PPS11-1500-B
Ancho de banda	1500 mm
Velocidad de banda	1.2 – 4.4 m/min
Carga admitida por metro lineal	300 kg/m.h
Dimensiones	5450 x 3350 x 2640 mm
Caudal	5 – 15 m ³ /h
Caudal de agua de lavado	3.0 m ³ /m.h

Fuente: Andritz Group (2023)

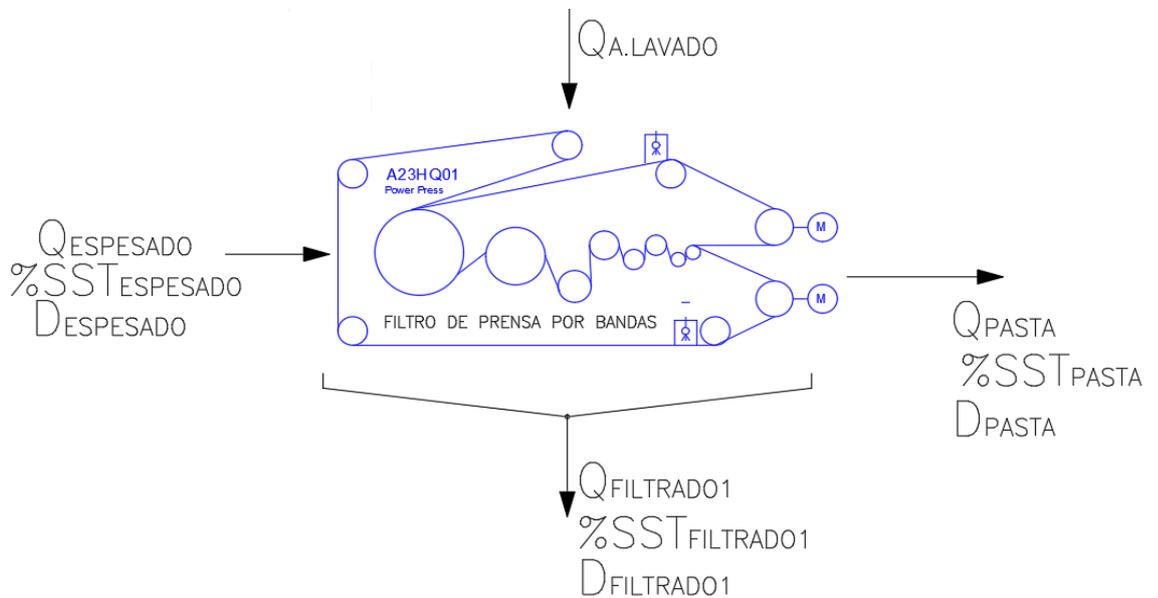
Figura 4.10: Equipo deshidratador filtro prensa de bandas



Fuente: Andritz Group (2023)

Ahora se realizará el balance de masas para determinar el caudal de filtrado y caudal de lodo espesado a la salida de la mesa de gravedad por bandas.

Figura 4.11: Balance de flujos en equipo deshidratador



Según la siguiente tabla del libro de CONAGUA (2015), se presentan los valores típicos del fluido al salir de un equipo de filtrado mediante bandas.

Tabla 4.11: Valores típicos del fluido al salir de un filtro de bandas

Tipo de lodo	Sólidos secos alimentados (%)	Carga por metro de longitud de la banda		Polímero seco ^a , sólidos secos g kg ⁻¹	Sólidos en la torta, (%)	
		L s ⁻¹	kg h ⁻¹		Típico	Rango
Lodo primario sin tratamiento	3-7	1.8-3.2	360-550	1-4	28	26-32
Lodo del sistema de lodos activados (LSLA).	1-4	0.7-2.5	45-180	3-10	15	12-20
Primario + LSLA (50:50)	3-6	1.3-3.2	180-320	2-8	23	20-28
Primario + LSLA (40:60)	3-6	1.3-3.2	180-320	2-10	20	18-25
Primario + lodo de los filtros rociadores	3-6	1.3-3.2	180-320	2-8	25	23-30
Primario estabilizado anaerobiamente	3-7	1.3-3.2	360-550	2-5	28	24-30
LSLA estabilizado anaerobiamente	3-4	0.7-2.5	45-135	4-10	15	12-20
Primario + LSLA estabilizado anaerobiamente	3-6	1.3-3.2	180-320	3-8	22	20-25

Fuente: CONAGUA (2015)

Se definen los siguientes valores:

- $D_{PASTA} = 1080 \text{ kg/m}^3$
- $D_{FILTRADO} = 1010 \text{ kg/m}^3$
- $\%SST_{PASTA} = 30 \%$
- $\%SST_{FILTRADO} = 0.09 \%$

Se conoce:

Tabla 4.12: Balance de flujos en el deshidratador filtro prensa de bandas

	Espesado	Pasta	Filtrado	Agua de lavado
Caudal (Q)	10.14 m ³ /h	Se desea hallar	Se desea hallar	4.5 m ³ /h
Sólidos totales (%SST)	3.5%	30%	0.09 %	Despreciable
Densidad (D)	1040 kg/m ³	1080 kg/m ³	1010 kg/m ³	1000 kg/m ³

Balance de masa de sólidos en la entrada y salida del equipo de espesamiento.

$$Q_{ESP} \times D_{ESP} \times \%SST_{ESP} = Q_P \times D_P \times \%SST_P + Q_{FIL} \times D_{FIL} \times \%SST_{FIL} \quad (4.10)$$

Reemplazando valores en la ecuación (4.10) se obtiene:

$$369.0 = 324 Q_{ESPESADO} + 0.909 Q_{FILTRADO} \quad (4.11)$$

Balance de flujo volumétrico en la entrada y salida del equipo de espesamiento.

$$Q_{ESPESADO} + Q_{A.LAVADO} = Q_{PASTA} + Q_{FILTRADO} \quad (4.12)$$

Reemplazando valores en la ecuación (4.12) se obtiene:

$$14.64 = Q_{PASTA} + Q_{FILTRADO} \quad (4.13)$$

Resolviendo las ecuaciones (4.11) y (4.13) se obtiene:

$$Q_{PASTA} = 1.10 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{FILTRADO} = 13.54 \text{ m}^3/\text{h}$$

d) Acondicionamiento

Luego que conocemos el tipo de equipo espesador y equipo de deshidratación, guiándonos de la figura 4.3 procedemos a dimensionar el equipo de acondicionamiento.

Considerando los aspectos de la tabla 2.9 de la sección 2 en el presente trabajo, en donde establece una comparación entre los tipos de polímeros existentes, se decide utilizar el **polímero orgánico en estado sólido**.

Los sistemas de alimentación de polímero consisten en tres tanques, uno de preparación de polímero con agua al 0.5% en composición, otro de dilución en agua del polímero al 0.05% en composición y por último el tanque de mezclado lodo – polímero.

En la tabla 2.10 presente en la sección 2 se enlistan dosis típicas de polímeros que se adicionan para el acondicionamiento de lodos en los filtros prensa de bandas. Las dosis de polímero están en función del tipo de lodo presente.

Ya que el lodo proveniente de la PTAR no proviene de tratamiento biológicos, entonces clasifica como un lodo primario, y según la tabla 2.10 el polímero debe ser suministrado a razón de 1.8 a 3.6 kg polímero/ton.

$$DOSIS_{POLÍMERO} = 3.0 \frac{kgpol}{tnseco}$$

De acuerdo a CONAGUA (2015), se utilizará un polímero catiónico de alto peso molecular dado que es el que se utiliza en espesamientos por gravedad mediante bandas. En el mercado se venden en sacos de 20 a 25 kg, sus características más importantes se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 4.13: Características del polímero

Parámetro	Características
Apariencia	Polvo granular blanco
Grado de carga (por ciento molar)	55
Peso molecular relativo	Alto
Densidad aparente, kg/m ³	750±50
Ph solución al 0.5% a 25°C	3.0 – 5.0
Viscosidad al 0.5%, N.s/m ²	0.65

Fuente: Wide Tec Laboratory (2019)

Se determina la cantidad de polímero por mes a utilizar.

$$M_{POLÍMERO} = 3.0 \frac{kgpol}{tnseco} \times 3.06 \frac{tnseco}{día}$$

$$M_{POLÍMERO} = 9.18 \frac{kgpol}{día}$$

$$M_{POLÍMERO} = 257.04 \frac{kgpol}{mes}$$

Se necesitarán:

$$Nro_{SACOS} = \frac{257.04 \frac{kgpol}{mes}}{20 \frac{kgpol}{saco}}$$

$$Nro_{SACOS} = 12.8 \cong 13 \text{ sacos de 20 kg por mes}$$

- Dimensionamiento del tanque de preparación de solución stock
El polímero seco se dosificará a un tanque de solución stock o solución madre. Este tanque preparará una solución al 0.5%. Se alimentará en forma continua con el polímero seco y agua clarificada. Debe tener un tiempo de retención de 1 hora para garantizar la dilución y maduración de la solución de polímero.

$$\frac{M_{POL}}{V_{SOL}} * 100\% = 0.5\% \quad (4.14)$$

$$V_{SOLSTOCK} = 230 \text{ L/h}$$

Tiempo necesario para la preparación de la solución, 1h.

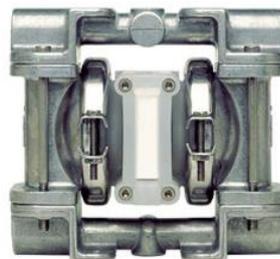
$$TRH_{TANQUE1} = 1 \text{ hora}$$

$$V_{TANQUE1} = 230 \times 1 = 230 \text{ L}$$

Se seleccionará un tanque de **250 L** junto con un controlador de nivel.

Según lo expuesto en la sección 2 para la selección de bombas hidráulicas tomando en cuenta la viscosidad del fluido (0.65 N.s/m^2), se seleccionó una bomba de transferencia de la solución stock hacia el tanque de dilución de polímero. Se utilizará una bomba de doble diafragma Wilden 0.25 Pro-Flo con capacidad para transportar 5gpm a 125 psi.

Figura 4.12: Bomba doble diafragma Wilden 0.05 Pro-Flo



Fuente: Will Pump (2024)

- Dimensionamiento del tanque de preparación de solución diluida
La solución madre o stock al 0.5% se enviará a un tanque mezclador para diluir la solución al 0.05% en composición. Este tanque se alimentará en forma continua con la solución stock y agua clarificada. Debe tener un tiempo de retención de 10 minutos para garantizar la dilución y maduración de la solución de polímero.

$$\frac{M_{POL}}{V_{SOL}} * 100\% = 0.05\% \quad (4.15)$$

$$V_{SOLDILUIDA} = 2295 \frac{L}{h}$$

Tiempo necesario para la preparación de la solución, 10min = 0.16h.

$$TRH_{TANQUE2} = 0.16 \text{ hora}$$

$$V_{TANQUE2} = 2295 \times 0.16 = 367 \text{ L}$$

Se seleccionará un tanque de **400 L** junto con un controlador de nivel.

Según lo expuesto en la sección 2 para la selección de bombas hidráulicas tomando en cuenta la viscosidad del fluido (0.65 N.s/m) se seleccionó una bomba de transferencia de la solución diluida hacia el tanque de mezcla lodo - polímero, se utilizará una bomba de doble diafragma Wilden 0.25 Pro-Flo con capacidad para transportar 15.5gpm a 125 psi.

Figura 4.13: Bomba doble diafragma Wilden 0.15 Pro-Flo



Fuente: Will Pump (2024)

- Tanque hermético necesario para la mezcla del polímero con el lodo

En este tanque se mezcla el polímero diluido al 0.05% con el lodo que fluye en el sistema de deshidratación, está ubicado anterior al equipo de espesamiento y se estima un tiempo de retención de 1 minuto para dimensionar el tanque hermético.

$$TRH_{TANQUE3} = 1 \text{ minuto} = \frac{1}{60} h$$

$$V_{TANQUE3} = (Q_{LODOS} + Q_{POL0.05\%}) \times TRH_{TANQUE3} \quad (4.16)$$

$$V_{TANQUE3} = \frac{(25.0 + 2.3) \times 1}{60} = 455 L$$

Se seleccionará un tanque hermético de **500 L** junto con un controlador de nivel.

- Agitadores para los tanques de mezclado de polímero

En el libro de CONAGUA (2015), se recomiendan valores de la gradiente de velocidad para determinados contenidos de mezcla. Se selecciona un $G=8.3 \text{ s}^{-1}$ y se reemplaza en la ecuación 2.3 descrita en la sección 2.

Agitador para el tanque de la solución al 0.5%.

$$P = G^2 \times \mu \times V = 8.3^2 \times 0.65 \times 0.25$$

$$P = 0.015 \text{ HP}$$

Agitador para el tanque de la solución al 0.05%.

$$P = G^2 \times \mu \times V = 8.3^2 \times 0.15 \times 0.4$$

$$P = 0.01 \text{ HP}$$

Agitador para el tanque hermético de mezcla lodo y polímero.

$$P = G^2 \times \mu \times V = 8.3^2 \times 0.20 \times 0.5$$

$$P = 0.01 \text{ HP}$$

Para los tres tanques se seleccionaron 3 agitadores SAVINOBARBERA AR30 de 0.075 a 0.1HP disponibles en el mercado con controladores de velocidad, uno para cada tanque. El diámetro de las hélices y la longitud del eje se va seleccionar acorde al tanque.

Figura 4.14: Agitador Savino Barbera AR30



Fuente: Savino Barbera (2024)

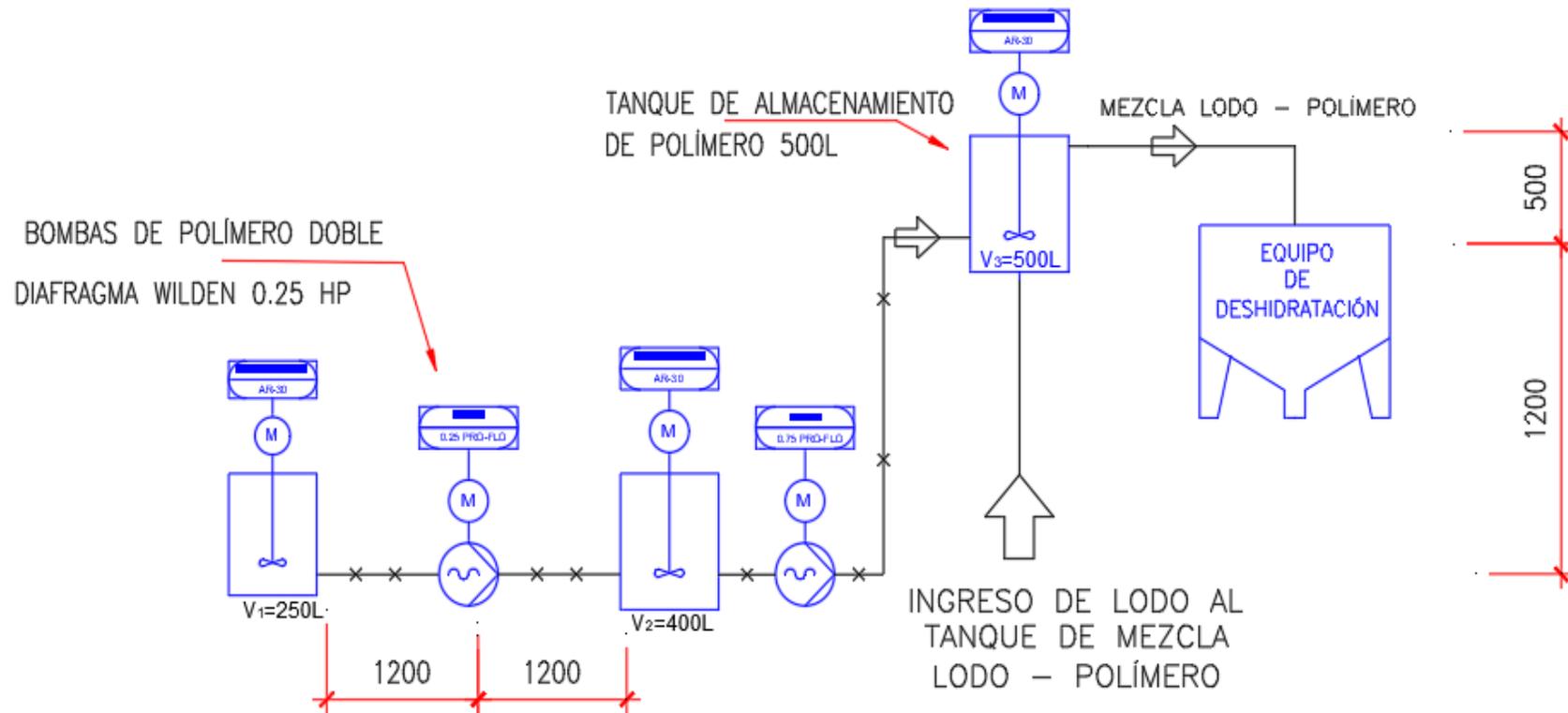
Tabla 4.14: Datos técnicos del agitador seleccionado

Reductor	Variador de velocidad
Potencia	0.075 – 01 HP
Diámetro rodete	200 – 400 mm
Longitudes	250 – 1000 mm

Fuente: Savino Barbera (2024)

El sistema de dosificación de polímero se muestra a continuación y en el Anexo N° 20.

Figura 4.15: Sistema de dosificación de polímero



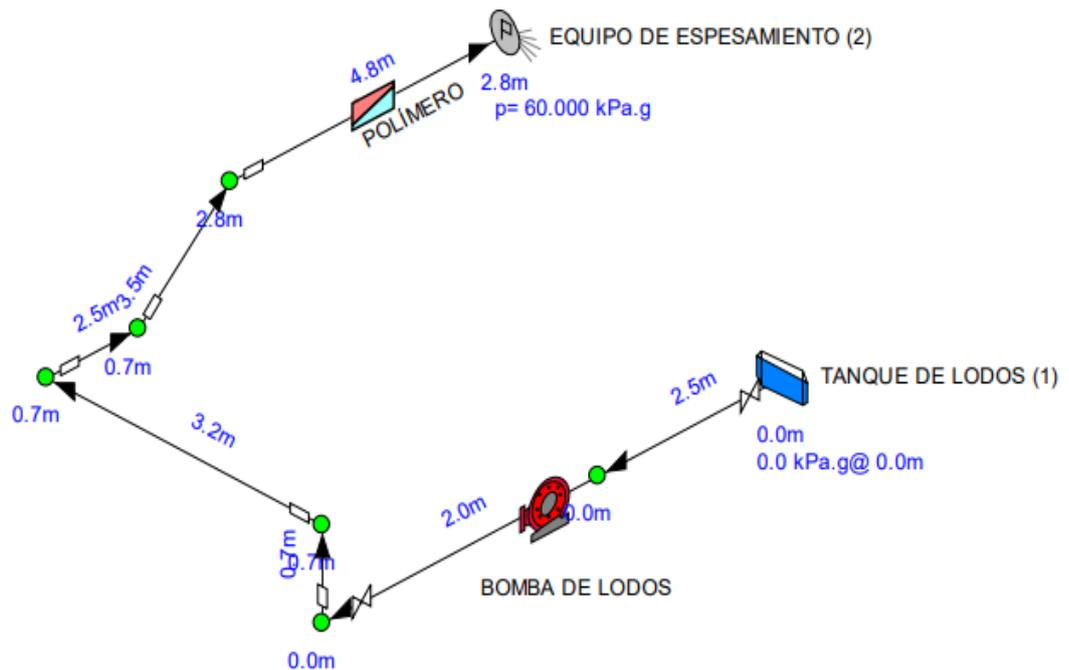
e) Diseño y selección de la línea de conducción de lodos

Para el diseño del sistema de transporte de lodos desde el tanque de lodos hacia el equipo de espesamiento se utilizó como referencia el *Manual de bombeo de aguas residuales* de Grundfos (2021).

Descripción de la línea de conducción

En la figura 4.16 se representó el punto de inicio y término del transporte de lodos, se colocó como punto 1 al inicio del transporte de lodos ubicado dentro del tanque de lodos. Se bombeará el fluido hasta el punto 2 ubicado al ingreso del equipo de espesamiento, donde según ficha técnica del equipo, se requiere que el lodo ingrese con una presión mínima de 8.7 PSI (60 kPa) para un funcionamiento eficiente del equipo.

Figura 4.16: Sistema de transporte del lodo



El lodo pasará por el tanque de mezcla lodo – polímero, el cuál es un tanque hermético y se considerará como una carga hidráulica.

Para dimensionar la bomba de lodos, se requiere determinar la curva del sistema. Para determinar la curva del sistema se requiere seguir determinados pasos, como primer paso se definen las principales propiedades del fluido en la tabla 4.15, las cuales fueron obtenidas del Anexo 4.

Tabla 4.15: Principales propiedades del fluido

Q_{DISEÑO}	25 m ³ /h
ρ_{LODO}	1020 kg/m ³
Viscosidad	0.017 P = 0.0017 Pa.s
ρ_{SÓLIDOS}	1800 kg/m ³
Concentración en volumen, C_V	5 %
Concentración en peso, C_P	1.5 %
Tamaño de las partículas d₅₀	217 μm

Además, se cuenta con las propiedades del sistema mostradas en la tabla 4.16.

Tabla 4.16: Propiedades del sistema de transporte de lodo

Diferencia de nivel entra 1 y 2	2.8 m
Longitud de la tubería	17.24 m
Material de la tubería	Acero inoxidable SCH STD
Presión requerida en el punto 2	8.7 PSI = 60
Presión atmosférica	101.3 KPa
Válvula de pie con filtro	1 unidad
Manómetro	2 unidades
Válvula check	1 unidad
Válvula de compuerta	2 unidades
Codo de 45°	2 unidades
Codo de 90°	2 unidad

Cálculos analíticos

Selección del diámetro de la tubería

Según Grundfos (2021), la velocidad máxima recomendada para el transporte de lodos primarios es de 2.0 m/s, esto con la finalidad de evitar un desgaste prematuro en la tubería por abrasión de los sólidos en suspensión. Además, la velocidad del fluido debe ser al menos 10% mayor a la velocidad crítica de sedimentación (V_S) debido a que si la velocidad del lodo en la tubería de impulsión es demasiado baja, los lodos y la arena tienen tiempo de depositarse, lo que aumenta el riesgo de atascos. En ese sentido, es necesario calcular la velocidad de sedimentación con la ecuación 2.15 considerando como posibles diámetros de la tubería 2 ½", 3" y 4".

- Velocidad de sedimentación para tubería de 2 ½",
Para una tubería de acero inoxidable SCH 40, se cuenta con el siguiente diámetro interno de tubería (Ver anexo 5).

$$D_i = 63 \text{ mm}$$

Además, la densidad del lodo y de los sólidos:

$$\rho_{LODO} = 1020 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{SÓLIDOS} = 1800 \text{ kg/m}^3$$

Del gráfico de Mac-Elvain y Cave (figura 4.17) se obtiene el factor de Durand, ingresando al gráfico con los siguientes datos:

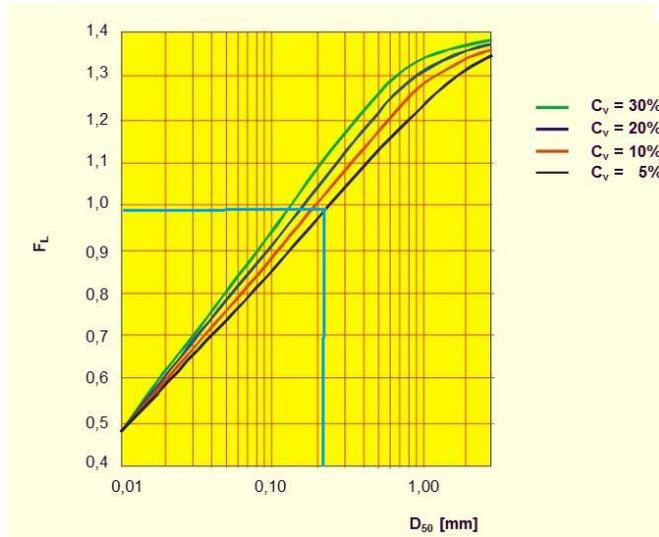
$$C_V = 5\%$$

$$d_{50} = 217 \mu\text{m}$$

De la figura 4.17, se obtiene:

$$F_{ME-C} = 0.98$$

Figura 4.17: Gráfico de Mac-Elvain y Cave



Fuente: Grundfos (2021)

Reemplazando en la ecuación 4.17:

$$V_D = 1.25 \times F_{ME-C} \times \sqrt[4]{2g \times \left(\frac{D_i}{1000}\right) \times \left(\frac{\rho_S}{\rho_L} - 1\right)} \quad (4.17)$$

$$V_D = 1.25 \times 0.98 \times \sqrt[4]{2 \times 9.81 \times \left(\frac{63}{1000}\right) \times \left(\frac{1800}{1020} - 1\right)}$$

$$V_D = 1.21 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, para una tubería de 2 ½":

$$V_{\text{mín}} = 1.10 \times V_D \quad (4.18)$$

$$V_{\text{mín}} = 1.33 \text{ m/s}$$

Para un caudal de operación de 25 m³/h, la velocidad del lodo al fluir por una tubería de 2 ½" será:

$$V_o = \frac{Q}{A_{2\frac{1}{2}}}$$

$$V_o = \frac{4 \times Q}{\pi \times D_i^2 \times 3600} \quad (4.19)$$

Donde:

V_o = Velocidad de operación para un tubo de 2 ½”.

Q = Caudal de operación del sistema.

D_i = Diámetro interior de la tubería de 2 ½”.

Reemplazando valores:

$$V_o = 2.23 \text{ m/s}$$

En este caso, no se puede seleccionar la tubería de 2 ½” debido a que la velocidad del lodo para el caudal de operación (25 m³/h) es mayor a la velocidad máxima recomendada por Grundfos (2021).

Realizando el mismo procedimiento para tuberías de 3” y 4” se obtuvo la tabla 4.17:

Tabla 4.17: Análisis de velocidad para cada tubería

	2 ½”	3	4
Velocidad de sedimentación, V_D	1.20	1.26	1.39
Velocidad mínima recomendada, V_{min}	1.32	1.38	1.52
Velocidad de operación del fluido, V_o	2.23	1.45	0.7

La velocidad de operación del fluido para cada tubería debe cumplir:

$$V_{min} < V_o < 2.0 \text{ m/s} \quad (4.20)$$

Donde:

V_{min} = Velocidad mínima recomendada, 10% mayor V_D .

V_o = Velocidad de operación del fluido

De las tuberías mencionadas, la que cumple la relación 4.20 es la de medida 3”.

Por lo tanto, para el transporte de lodos se usarán tubos de 3” SCH 40 en acero inoxidable.

Balance de energía en el sistema de bombeo

La energía que debe proporcionar la bomba al sistema esta dada por:

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_L} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_T \quad (4.22)$$

Donde:

$$H_E = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_L} \right) + (Z_2 - Z_1) = \text{Se le denomina carga estática.}$$

$$H_D = \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) = \text{Se le denomina carga dinámica.}$$

h_T = Pérdidas por fricción.

Cálculo de la carga estática

Se tiene como requerimiento del sistema que la presión en la descarga sea 8.7 PSI (por ficha técnica del equipo espesador), es decir, $P_2 = 60 \text{ KPa}$. Además, se conoce que la presión manométrica en la superficie del tanque de lodos es cero.

Con respecto a la diferencia de altura entre la descarga y succión del lodo, se considerará para el caso crítico, es decir, la altura de succión crítica corresponde cuando el tanque se encuentra con un nivel mínimo con respecto al suelo, de la figura 4.16:

$$Z_2 - Z_1 = 2.8 \text{ m}$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.23 para la carga estática, se tiene:

$$H_E = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_L} \right) + (Z_2 - Z_1) \quad (4.23)$$

$$H_E = \left(\frac{60 - 0}{10.0} \right) + 2.8$$

$$H_E = 8.8 \text{ m}$$

Cálculo de la carga dinámica

La velocidad en el punto 1 (succión) se consideran cero debido a que el lodo en encuentra reposo, además la velocidad en el punto 2 es mínima

al ingresar el lodo al equipo de espesamiento mediante un distribuidor del lodo con área significativa, lo que ocasiona una velocidad cercana a cero.

$$H_D = \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (4.24)$$

$$H_D = 0$$

Cálculo de las pérdidas por fricción en la succión

Se determinaron las pérdidas en tuberías y accesorios en la sección comprendida entre el punto 1 y la bomba de lodos (figura 4.16).

Las pérdidas por fricción están divididas en dos: las pérdidas en tramos rectos y las pérdidas en accesorios, como indica la ecuación (4.25):

$$h_{TS} = h_{SR} + h_{SA} \quad (4.25)$$

Donde:

h_{TS} = Pérdidas totales en la succión.

h_{SR} = Pérdidas por tramos rectos en la succión.

h_{SA} = Pérdidas por accesorios en la succión.

Pérdidas por tramos rectos en la succión

Se utilizó la ecuación 2.10 de Hazen – Williams descrita en la sección 2. Para determinar el factor de fricción f se utilizó el Diagrama de Moody (Anexo N° 7), pero antes de necesitó calcular el número de Reynolds y la rugosidad relativa.

La tubería en la succión es de diámetro nominal 3" SCH 40, el diámetro interior de la tubería es de 77.9 mm (Anexo N° 5).

La velocidad de operación para este diámetro y un caudal de 25 m³/h se determinó anteriormente y se encuentra en la tabla 4.13, además se conoce que:

$$V_o = 1.457 \text{ m/s}$$

$$\rho_L = 1020 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_L = 0.0017 \text{ Pa.s}$$

Se determinó el número de Reynolds con la ecuación 2.13 detallada en la sección 2. Reemplazando valores:

$$Re = \frac{D \times V_o \times \rho_L}{\mu_L}$$
$$Re = \frac{0.0779 \times 1.457 \times 1020}{0.0017}$$
$$Re = 6.8 \times 10^4$$

Del anexo N° 6 se determinó la rugosidad relativa para la tubería de material acero inoxidable.

$$\epsilon = 0.05 \text{ mm}$$

Además:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0.05}{77.9} = 6.4 \times 10^{-4}$$

Con el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se ingresó al Diagrama de Moody que se encuentra en el anexo N° 7, se obtiene el factor de fricción:

$$f = 0.018 \text{ mm}$$

De la figura 4.16 se obtiene la longitud del tramo recto en la tubería de succión.

$$L_S = 2.54 \text{ m}$$

La pérdida de carga debido al tramo recto en la succión se determinó reemplazando valores en la ecuación 2.19:

$$h_{SR} = f \cdot \frac{L_S}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$
$$h_{SR} = 0.018 \cdot \frac{2.54}{0.0779} \cdot \frac{1.457^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_{SR} = 0.0635 \text{ m}$$

Por lo tanto, las pérdidas en el tramo recto de la succión es 0.0635m.

Pérdidas por accesorios en la succión

Las pérdidas por fricción en accesorios como válvulas, codos, uniones, está determinada por la ecuación (2.14) detallada en la sección 2:

De los anexos N° 8 y N° 9 se determinó el coeficiente de pérdida para cada uno de los accesorios necesarios en la succión del sistema, estos se sintetizan en la tabla 4.18:

Tabla 4.18: Coeficiente de pérdida para accesorios en la succión

Accesorio	K
1 Válvula de pie con filtro	15.0
1 válvula de compuerta	0.9
ΣK	15.9

La pérdida de carga debido a los accesorios en el tramo de succión se determina reemplazando valores en la ecuación 2.14.

$$h_{SA} = \Sigma K \cdot \frac{V_o^2}{2g}$$
$$h_{SA} = 15.9 \times \frac{1.457^2}{2 \times 9.81}$$

$$\mathbf{h_{SA} = 1.72 m}$$

La pérdida de carga total en el tramo de succión se determina reemplazando valores en la ecuación 4.25:

$$h_{TS} = h_{SR} + h_{SA} = 0.0635 + 1.72$$

$$\mathbf{h_{TS} = 1.78 m}$$

Por lo tanto, la pérdida total debido a fricción en el tramo de succión es 1.78m.

Cálculo de las pérdidas por fricción en la descarga

Se determinará las pérdidas en tuberías y accesorios en la sección comprendida entre la bomba y el punto 2 de la figura 4.16. Las pérdidas por fricción están divididas en dos: las pérdidas en tramos rectos y las pérdidas en accesorios, como indica la ecuación 4.26.

$$h_{TD} = h_{DR} + h_{DA} \quad (4.26)$$

Donde:

h_{TD} = Pérdidas totales en la descarga.

h_{DR} = Pérdidas por tramos rectos en la descarga.

h_{DA} = Pérdidas por accesorios en la descarga.

Pérdidas por tramos rectos en la descarga

Dado que el diámetro de la tubería es el mismo tanto para la succión y la descarga, el factor de fricción es igual que el del tramo de succión y se obtiene del Diagrama de Moody (Anexo N° 7).

$$f = 0.018 \text{ mm}$$

La longitud del tramo recto en la descarga se representa en la figura 4.16.

$$L_S = 1.7 + 3.2 + 2.5 + 2.5 + 2.0 + 2.8$$

$$L_S = 14.7 \text{ m}$$

La pérdida de carga debido al tramo recto en la descarga se determina reemplazando valores en la ecuación 2.19.

$$h_{DR} = f \cdot \frac{L_D}{D} \cdot \frac{V^2}{2g}$$
$$h_{DR} = 0.018 \times \frac{14.7}{0.0779} \times \frac{1.457^2}{2 \times 9.81}$$

$$h_{DR} = 0.368 \text{ m}$$

Por lo tanto, las pérdidas en el tramo recto de la descarga es de 0.368 m.

Pérdidas por accesorios en la descarga

De los anexos N° 8 y N° 9 se determinaron los coeficientes de pérdida para cada uno de los accesorios necesarios para el transporte en la descarga, estos se sintetizan en la tabla 4.19.

Tabla 4.19: Coeficiente de pérdida para accesorios en la descarga

Accesorio	K
1 codo de 90° radio largo	0.45
2 codos de 45°	0.35
1 válvula de compuerta	0.9
1 válvula check	10
1 entrada al tanque de mezcla	0.8
1 salida del tanque de mezcla	2
ΣK	14.5

La pérdida de carga debido a los accesorios en el tramo de descarga se determina reemplazando valores en la ecuación 2.14.

$$h_{DA} = \sum K \cdot \frac{V_o^2}{2g}$$
$$h_{DA} = 14.5 \times \frac{1.457^2}{2 \times 9.81}$$
$$\mathbf{h_{DA} = 1.57 m}$$

La pérdida de carga total en el tramo de descarga se determina reemplazando valores en la ecuación 4.26.

$$h_{TD} = h_{DR} + h_{DA} = 0.368 + 1.57$$

$$\mathbf{h_{TD} = 1.94 m}$$

Por lo tanto, la pérdida total debido a fricción en el tramo de descarga es 1.94m.

La pérdida total por fricción en el transporte del lodo es igual a la suma de las pérdidas totales en la succión y a las pérdidas totales en la descarga.

$$h_T = h_{TS} + h_{TD} = 1.78 + 1.94$$

$$\mathbf{h_T = 3.72 m}$$

Reemplazando estos valores en el balance de energía para el sistema de bombeo (ecuación 4.2), se obtiene que la energía necesaria para el transporte del lodo está determinada por:

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma_L} \right) + (Z_2 - Z_1) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) + h_T$$

$$H_B = 8.8 + 0 + 3.72$$

$$\mathbf{H_B = 12.52 m}$$

Cálculo del factor de corrección para el transporte de lodos.

De acuerdo a Grundfos (2021), a la energía requerida para el transporte de lodos calculada en el párrafo anterior se le debe aplicar un factor de corrección para obtener la curva característica de operación para el transporte de lodos, pues las pérdidas de carga para lodo en cada componente son del 10 al 25% mayores que para el transporte de agua.

Para lo cual se calculó el factor de corrección, denominado “heat radio” (H.R), mediante la ecuación 2.17 detallada en la sección 2.

$$H.R = 1 - 0.11 \times C_p (S_s - 1)^{0.64} \times \ln \frac{d_{50}}{22.7}$$

$$H.R = 1 - 0.11 \times (1.5)(1.8 - 1)^{0.64} \times \ln \frac{217}{22.7}$$

$$\mathbf{H.R = 0.677}$$

En ese sentido, la energía necesaria para transportar el lodo a través del sistema se ve afectada mediante el factor de corrección $H.R$ de la siguiente manera:

$$H_{LODO} = \frac{H_B}{H.R} = \frac{12.52}{0.677}$$

$$\mathbf{H_{LODO} = 18.47 m}$$

Ahora se puede obtener una relación entre la altura del sistema y el caudal de lodo, a través de una función cuadrática de la forma:

$$H = A + BQ^2$$

Reemplazando los valores obtenidos para A, H_{LODO} y Q , se obtiene la siguiente función:

$$H_{LODO} = 8.8 + 0.016Q^2 \text{ (m)}$$

Donde:

H_{LODO} = Energía por unidad de peso necesaria para transportar el lodo (m)

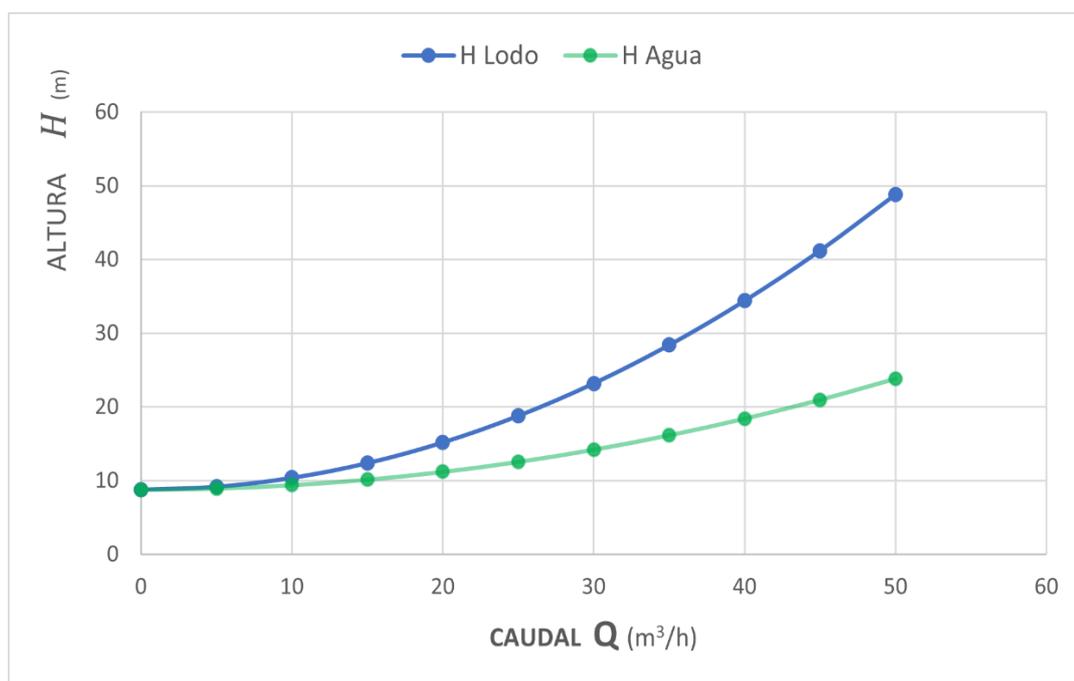
Q = Caudal en operación (m³/h)

Esta función se graficó dándole valores, los cuales se muestran en la tabla 4.20 y se pudo obtener la curva del sistema, figura 4.18.

Tabla 4.20: Valores tabulados para la ecuación del sistema

Q	H
0	8.8
5	9.2
10	10.4
15	12.4
20	15.2
25	18.8
30	23.2
35	28.4
40	34.4
45	41.2
50	48.8

Figura 4.18: Curva del sistema



En la figura 4.18 se puede apreciar la diferencia entre la curva del sistema cuando el fluido es agua (línea verde) y cuando el fluido es lodo (línea azul). La energía que se necesita para transportar lodo es mayor que para el agua en cualquier punto. Esto es debido al factor de corrección que se aplicó para el transporte de lodo.

Con la curva del sistema se busca una bomba para el transporte de lodos que tenga la mayor eficiencia en un punto cercano a:

$$Q_{LODO} = 25.0 \text{ m}^3/h$$

$$H_{LODO} = 18.47 \text{ m}$$

Según Metcalf y Eddy (2010), las bombas centrífugas de diseño especial, como las de rodete helicoidal, vórtice y de rodete sin alabes, se utilizan para el bombeo del lodo primario en plantas de tratamiento de grandes dimensiones.

Con esta referencia, se buscó en catálogos de Hidrostral, la cual es una empresa líder en la fabricación de bombas de aguas residuales y líquidos con contenido de sólidos. Se encontró una bomba que se adecuaba al punto de operación requerido y a las características del lodo en cuestión.

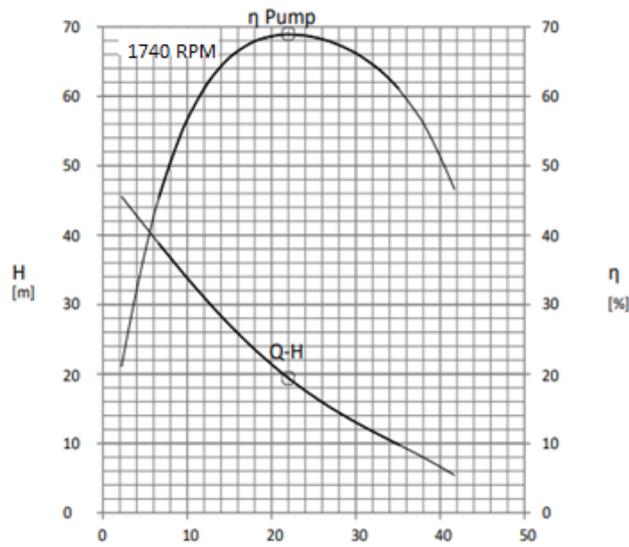
Esta es una bomba centrífuga con tornillo helicoidal de paso integral modelo Hidrostral ISO2858-INOX, sus principales parámetros y curva característica se muestran a continuación. La ficha técnica de esta bomba se puede observar en los anexos N° 10 y N° 11.

Tabla 4.21: Datos técnicos de bomba de lodos seleccionada

Modelo	Hidrostral ISO2858-INOX
Succión	80 mm Taladrado a PN16
Descarga	50 mm Taladrado a PN16
Impulsor	LHN
Pasaje libre	50 mm
Peso	30 kg
Potencia nominal motor	7.5 kW
Velocidad	1740 rpm

Fuente: Hidrostral (2024)

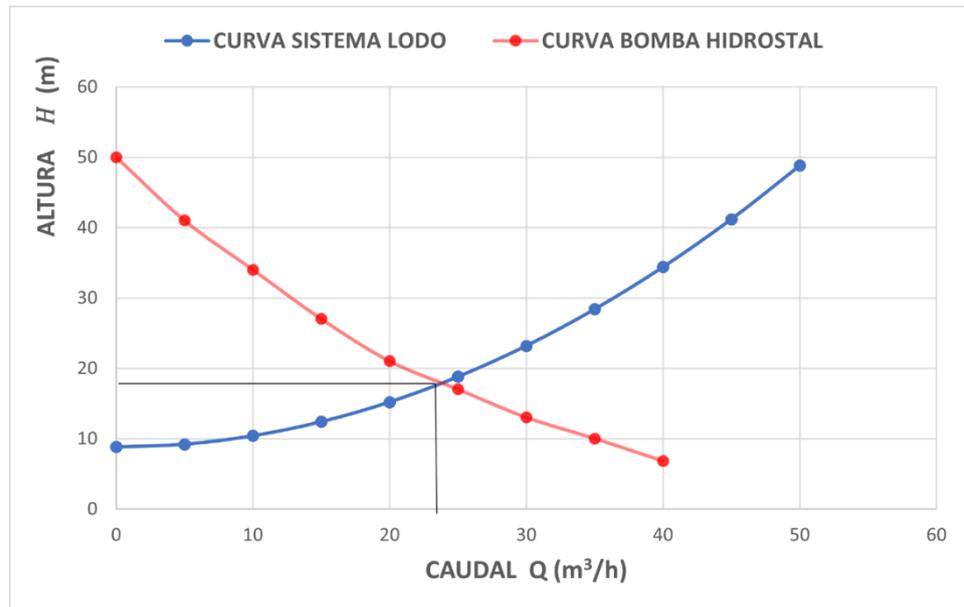
Figura 4.19: Curva característica de la bomba H-Q, η - Q



Fuente: Hidrostral (2024)

Se realizó una superposición de la curva del sistema y la curva característica de la bomba seleccionada para determinar el punto de operación.

Figura 4.20: Determinación gráfica del punto de operación



De la figura 4.20 se puede obtener el punto de operación del sistema:

$$Q_{OPERACIÓN\ TEÓRICO} = 23.5\ m^3/h$$

$$H_{OPERACIÓN\ TEÓRICO} = 19\ m$$

Por lo tanto, para filtrar 200 m³/día de lodo, el sistema de filtrado tendrá que operar 8.5 horas al día.

El porcentaje de agua filtrada del lodo no se ve afectado dado que las horas diarias de funcionamiento del sistema se aumentará, por ende, al final del día se habrá procesado la misma cantidad de lodo y obtenido la misma cantidad de agua filtrada.

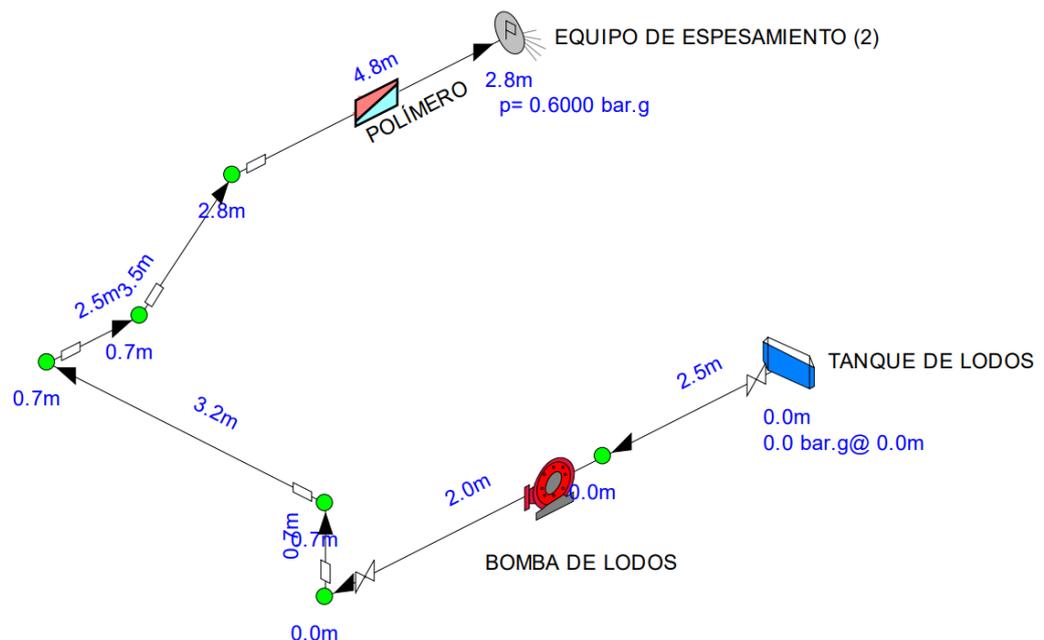
4.6.3 Simulación del transporte de lodo a través del sistema

Se utilizó el software Pipe Flow Expert V7.40 para verificar que la bomba seleccionada en la sección 4.6.2 pueda transportar el lodo desde el tanque de lodos hacia el equipo de espesamiento. Para lo cual, la simulación se divide en 3 procesos:

a) Determinación de la altura necesaria para el transporte de lodos a un caudal de 25 m³/h desde el tanque de lodos hasta el equipo de espesamiento.

En el software Pipe Flow Expert se representó el transporte de lodos, la bomba de lodos y el equipo de espesamiento como se muestra en la figura 4.21.

Figura 4.21: Esquema del sistema de filtrado de lodos



Para proceder con la simulación, se requiere ingresar que tipo de fluido se está transportando, para lo cual el software cuenta con un banco de fluidos con sus determinadas propiedades, y en caso no se encuentre el fluido con las propiedades de su proyecto, se va requerir ingresar de forma manual cada una de las propiedades del fluido que se desea estudiar.

En el caso del presente trabajo de investigación se está trabajando con lodo primario de propiedades presentadas en el anexo N° 4. En el software se encontró que el fluido denominado “SLUDGE” cumplía con la mayoría de propiedades requeridas, sin embargo se necesitó editar algunas propiedades para obtener un lodo con las mismas características del que se tiene en Papelera Reyes S.A.C. En la figura 4.22, se muestra una parte del banco oil de fluidos con el que cuenta el software, también se resaltó en un cuadro el fluido seleccionado para la presente tesis.

Figura 4.22: Selección del fluido a transportar

The screenshot shows a software window titled "Fluid data" with a close button (X) in the top right corner. It is divided into two main sections: "Fluid properties:" and "Fluid Properties Database:".

Fluid properties:

Name	Formula	Temperature °C	Pressure bar g	Density kg/m³	Viscosity Centipoise	Vapour Press. kPa (abs)	State
Sludge	98.5 %H2O	20.000	0.000000	1020.000000	1.500000	75.000000	Liquid

Buttons: Cancel, Save (checked)

Fluid Properties Database:

Transfer Selected Fluid

Name	Formula	Temperature °C	Pressure bar g	Density kg/m³	Viscosity Centipoise	Vapour Press. kPa (abs)	State
Olive oil	N/A	20.000	0.000000	920.000000	83.676000	N/A	Liquid
Pentane	C5 H12	20.000	0.000000	625.750000	0.228000	56.795000	Liquid
Phenol	C6 H6 O	20.000	0.000000	1073.000000	12.740000	0.029000	Liquid
SAE 10W engine oil	N/A	40.000	0.000000	877.000000	34.200000	0.100000	Liquid
SAE 10W-30 engine oil	N/A	40.000	0.000000	869.000000	67.800000	0.100000	Liquid
SAE 15W-30 engine oil	N/A	40.000	0.000000	873.000000	96.000000	0.100000	Liquid
SAE 15W-40 multigrade oil	N/A	40.000	0.000000	881.000000	110.100000	0.100000	Liquid
SAE 30 engine oil	N/A	40.000	0.000000	888.000000	90.600000	0.100000	Liquid
SAE 40 engine oil	N/A	40.000	0.000000	890.000000	121.900000	0.100000	Liquid
SAE 50 engine oil	N/A	40.000	0.000000	894.000000	181.500000	0.100000	Liquid
SAE 5W-40 synthetic oil	N/A	40.000	0.000000	868.000000	83.800000	0.100000	Liquid
Sludge	98.5 %H2O	20.000	0.000000	1020.000000	1.500000	75.000000	Liquid
Sunflower oil	N/A	20.000	0.000000	920.000000	64.073000	N/A	Liquid
Tetrabromoethane	C2H2 Br4	16.850	0.000000	2964.000000	12.328000	0.010000	Liquid
Toluene (Methylbenzene)	C7 H8	20.000	0.000000	867.000000	0.585000	2.914000	Liquid
Turpentine	N/A	20.000	0.000000	870.000000	1.490000	0.250000	Liquid
Water	H2 O	0.000	0.000000	1000.000000	1.792000	0.611000	Liquid
Water	H2 O	5.000	0.000000	1000.000000	1.518000	0.873000	Liquid

Units: Metric (selected), Imperial

Categories: Liquids (selected), Gases

Buttons: Add New Fluid, Remove Fluid

También se seleccionó el material y diámetro de la tubería en base a los cálculos realizados en la sección 4.6.2. Además se ingresaron los accesorios del sistema de transporte del lodo, tales como válvulas de compuerta, codo de 90°, válvula check, codo de 45°, etc.

En la figura 4.23 se muestra las medidas estándar para tuberías con el que cuenta el software Pipe Flow Expert, además se resaltó en un cuadro la medida de la tubería seleccionada (3") y el material seleccionado (Steel ANSI SCH 40).

Figura 4.23: Selección del diámetro y material de la tubería

Pipe diameter data X

Pipe data: P3 (Pipe Id: 3)

Material	Schedule / Class	Internal Roughness (inch)
Steel (ANSI)	Sch. 80	0.001811

Nominal Size	Internal Diam. inch	Wall Thick. inch	Outside Diam. inch	Weight lbs/ft	Internal Vol ft ³ / 100 ft	Surface Area ft ² / 100 ft
80 mm	2.900	0.300	3.500	10.2643	4.5869	91.6298

Save Pipe

↑ Transfer Selected Size Steel (ANSI) Sch. 80, IR = 0.001811 inch ▲ ▼

Nominal Size	Internal Diam. inch	Wall Thick. inch	Outside Diam. inch	Weight lbs/ft	Internal Vol ft ³ / 100 ft	Surface Area ft ² / 100 ft
2"	1.939	0.218	2.375	5.027	2.0506	62.1774
2-1/2"	2.323	0.276	2.875	7.669	2.9432	75.2673
3"	2.900	0.300	3.500	10.264	4.5869	91.6298
3-1/2"	3.364	0.318	4.000	12.518	6.1722	104.7198
4"	3.826	0.337	4.500	15.000	7.9839	117.8097
5"	4.813	0.375	5.563	20.800	12.6345	145.6390
6"	5.761	0.432	6.625	28.604	18.1019	173.4421
8"	7.625	0.500	8.625	43.434	31.7108	225.8020
10"	9.562	0.594	10.750	64.499	49.8683	281.4343
12"	11.374	0.688	12.750	88.726	70.5592	333.7942
14"	12.500	0.750	14.000	106.248	85.2212	366.5191
16"	14.312	0.844	16.000	136.763	111.7193	418.8790
18"	16.124	0.938	18.000	171.110	141.7989	471.2389
20"	17.938	1.031	20.000	209.096	175.4993	523.5988
22"	19.750	1.125	22.000	251.085	212.7461	575.9587
24"	21.564	1.218	24.000	296.675	253.6215	628.3185

Metric Imperial

En la figura 4.24 se presentan los diversos accesorios que se pueden ingresar (cada uno de estos cuenta con su coeficiente de pérdida, K). Se resaltó en un cuadro los accesorios seleccionados para la tubería de descarga en el sistema de filtrado.

Figura 4.24: Selección de accesorios en las tuberías del sistema

Fittings on: P1, Steel (ANSI), 80 mm ,ID=73.660 mm (Pipe Id: 1)

Symbol	Type	Metric	Imperial	Description	K value	Qty	Position
	Gate	80 mm	3"	Gate Valve	0.1400	1	End of Pipe
	SwCh	80 mm	3"	Swing Check Valve	2.2000	1	End of Pipe
	LB	80 mm	3"	Long Bend	0.2800	1	End of Pipe

Total K = 2.62

Save Clear Cancel

Fittings: Pipe Size 80 mm 3" Add Selected Item On To Pipe

Symbol	Type	Metric	Imperial	Description	K
	SB	80 mm	3"	Standard Bend	0.5300
	LB	80 mm	3"	Long Bend	0.2800
	PB	80 mm	3"	Pipe Bend	0.2100
	E45	80 mm	3"	Elbow 45 deg.	0.2800
	RB	80 mm	3"	Return Bend	0.8900
	MB45	80 mm	3"	Mitre Bend 45 deg.	0.2700
	MB90	80 mm	3"	Mitre Bend 90 deg.	1.0600
	Gate	80 mm	3"	Gate Valve	0.1400
	Globe	80 mm	3"	Globe Valve	6.0000
	Angle	80 mm	3"	Globe Valve Angled	2.6500
	Plug	80 mm	3"	Plug Valve Straightway	0.3200
	Bfly	80 mm	3"	Butterfly Valve	0.8100
	BallFB	80 mm	3"	Ball Valve Full Bore	0.0500
	BallRB	80 mm	3"	Ball Valve Reduced Bore	1.2000
	LiftCh	80 mm	3"	Lift Check Valve	10.8000
	AngleCh	80 mm	3"	Lift Check Valve Angled	1.0000
	SwCh	80 mm	3"	Swing Check Valve	2.2000
	TiltCh	80 mm	3"	Tilting Disk Check	2.2000
	ChWaf	80 mm	3"	Wafer Check Valve	5.5000
	Foot	80 mm	3"	Foot Valve with Strainer	7.6000
	Hinged	80 mm	3"	Hinged Foot Valve with Strainer	1.4000
	St	80 mm	3"	Strainer	1.0000
	TT	80 mm	3"	Through Tee	0.3600
	BT	80 mm	3"	Branch Tee	1.0800
	ExitCon	80 mm	3"	Pipe Exit to Container	1.0000
	Open	80 mm	3"	Open Pipe Exit	1.0000
	EntProj	80 mm	3"	Pipe Entry Projecting	0.7800
	EntSharp	80 mm	3"	Pipe Entry Sharp	0.5000

Double click on a fitting to add it to the pipe.

Calculate K value for

Entrance Rounded

Gradual Enlargement

Gradual Contraction

Sudden Enlargement

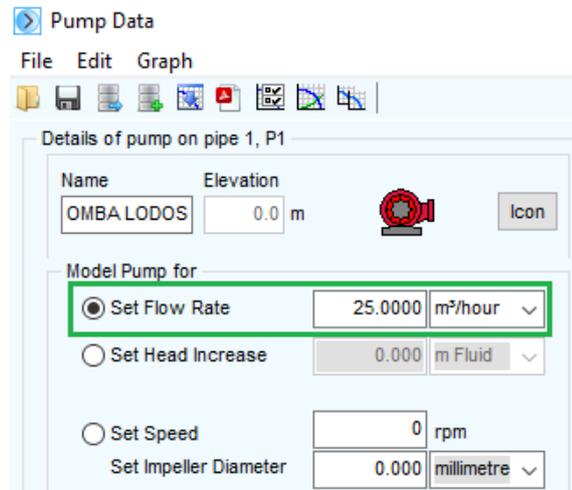
Sudden Contraction

Long Pipe Bend

Con estos datos, el sistema ya estaría prácticamente definido, sin embargo falta ingresar los datos de la bomba de lodos.

En esta primera parte de la simulación no se ingresaron los datos de la bomba, debido a que se quiere obtener la altura y potencia requerida para impulsar el lodo a través del sistema de tuberías, es decir, se quiere obtener la curva del sistema. Para esto, el software brinda la opción de establecer solo el caudal que se desea transportar. Se estableció el caudal a 25 m³/h, como se muestra en la figura 4.25.

Figura 4.25: Bomba definida para transportar 25 m³/h de lodo



Con el ingreso de estos datos, el sistema ya se encuentra definido y se puede indicar al software simular el transporte de lodos. En la figura 4.26 se muestra la tabla de resultados, en donde se resaltó en un cuadro la altura de impulsión que necesita el sistema para transportar lodo a razón de 25 m³/h del punto 1 al punto 2 y el valor de NPSH disponible.

$$Q = 25.0 \text{ m}^3/h$$

$$H = 19.90 \text{ m}$$

Figura 4.26: Resultados del sistema de filtrado a caudal definido

$$NPSH_a = 2.484 \text{ m}$$

Pipe 1 (P1)

Flow = 25.000 m³/hour
 Mass Flow = 7.0833 kg/sec
 Velocity = 1.630 m/sec
 Length = 2.000 m
 Inner Diam = 73.660 mm
 Start Elevation = 0.000 m
 End Elevation = 0.000 m
 Start Pressure = -11.480 kPa.g
 End Pressure = 183.606 kPa.g
 Total dP Loss = -19.503 m.hd
 Elevation Change = 0.000 m
 Elevation Change Loss = 0.000 m.hd
 Friction Loss = 0.079 m.hd
 Entry Fitting Loss = 0.000 m.hd
 Exit Fitting Loss = 0.317 m.hd
 Pump Suction = -11.480 kPa.g
 Pump Discharge = 187.561 kPa.g
 Pump Head = 19.899 m.hd
 Pump NPSHa = 2.484 m.hd

b) Búsqueda y selección de la bomba adecuada mediante la plataforma Pump-Flo

Pump-Flo es una plataforma en línea en donde se presentan todas las

Figura 4.27: Plataforma Pump-Flo

bombas de diferentes marcas y modelos disponibles en el mercado.

En la simulación realizada en el inciso “a” se obtuvo como resultados la altura estática y neta que debe tener la bomba para transportar lodo a 25 m³/h (figura 4.26). Con estos datos, la plataforma Pump-Flo determinará la bomba con mayor eficiencia en el punto de operación.

Al ingresar al software se debe seleccionar con que marca se desea trabajar. En este caso, se seleccionó la marca HIDROSTAL, ya que es una empresa dedicada especialmente a la fabricación de bombas para aguas residuales y es la marca de la bomba que se seleccionó mediante catálogos en la sección 4.6.2. En la figura 4.27 se presenta las diversas marcas que dispone la plataforma y se resaltó la marca seleccionada.



Figura 4.28: Datos de entrada para la plataforma Pump-Flo

Luego de seleccionar la marca de la bomba, la plataforma solicita los datos de entrada tales como el caudal, altura total, altura estática. Estos datos se obtuvieron de los resultados mostrados en la figura 4.26 luego de la simulación del sistema con el software Pipe Flow Expert.

A su vez se ingresaron las propiedades del fluido de trabajo, como se muestra en la figura 4.28.

Punto de Diseño Nominal

Caudal	<input type="text" value="25.0"/>	<input type="text" value="m³/hr"/>	<input type="button" value="Cambiar Unidades"/>
Altura Total	<input type="text" value="18.5"/>	<input type="text" value="m"/>	
Altura Estática	<input type="text" value="8.8"/>	<input type="text" value="m"/>	

PMR

Cuasi incidente % de altura

Puntos de Operación

Puntos de Operación adicionales

- Caudales por Predeterminado
- Caudal especificado por el usuario
- Caudal, Altura Total, & Altura estático, especificado por el usuario

Fluido y NPSH

NPSHa m

Porcentaje de margen

Con estos datos, la plataforma buscó en su banco de bombas de la marca Hidrostal. Encontró varias bombas que cumplen con tales condiciones, de las cuáles se seleccionó la segunda opción que se resalta en la figura 4.29. La bomba Hidrostal ISO 2858 – INOX es la que seleccionó con valores de entrada teóricos a partir de catálogos en la sección 4.6.2.

Figura 4.29: Lista de bombas que cumplen con la función

Tienda > Criterios > Lista de selección													
Selección manual													
Punto de Diseño: 25 m ³ /hr, 18.5 m													
Vista previa	Tipo	Tamaño	Curva	Velocidad (rpm)	Diámetro	Altura (m)	Eficiencia (%)	PMR (%)	NPSHr (m)	Potencia (kW)	Motor (kW)	Armazón	Caudal má (m ³ /hr)
	ISO 2858	50-200	1-050-200-4P-PF	1740	197,1 mm	18,5	64,5	65,7	1,06	1,99	6	100L	---
	ISO 2858-INOX	50-200	1-050-200-4P-INOX	1740	200 mm	18,5	64	64,9	1,3	2,01	7.5	100L	---
	ISO 2858-INOX	40-125	1-040-125-2P-INOX	3460	110 mm	18,7	58,5	58,5	2,81	2,24	5.8	90L	---
	ISO 2858-INOX	65-200	1-065-200-4P-INOX	1745	193 mm	18,5	54,9	72,9	2,27	2,34	5,5	112M	---
	ISO 2858	65-315	1-065-315-6P-PF	1150	295 mm	18,7	50,3	51,5	1,55	2,61	4,5	132S	---
	ISO 2858	32-125	1-032-125-2P-PF	3430	131,1 mm	18,5	46,8	58,8	5,19	2,74	3	90L	---

La plataforma Pump-Flo permite descargar la hoja de datos de la bomba Hidrostal ISO 2858 – INOX. Además, el software brinda la curva característica de la bomba y algunos de sus puntos de operación. La ficha técnica de esta bomba se puede observar en el anexo N° 12.

Figura 4.30: Curva característica de Hidrostal ISO 2858 - INOX

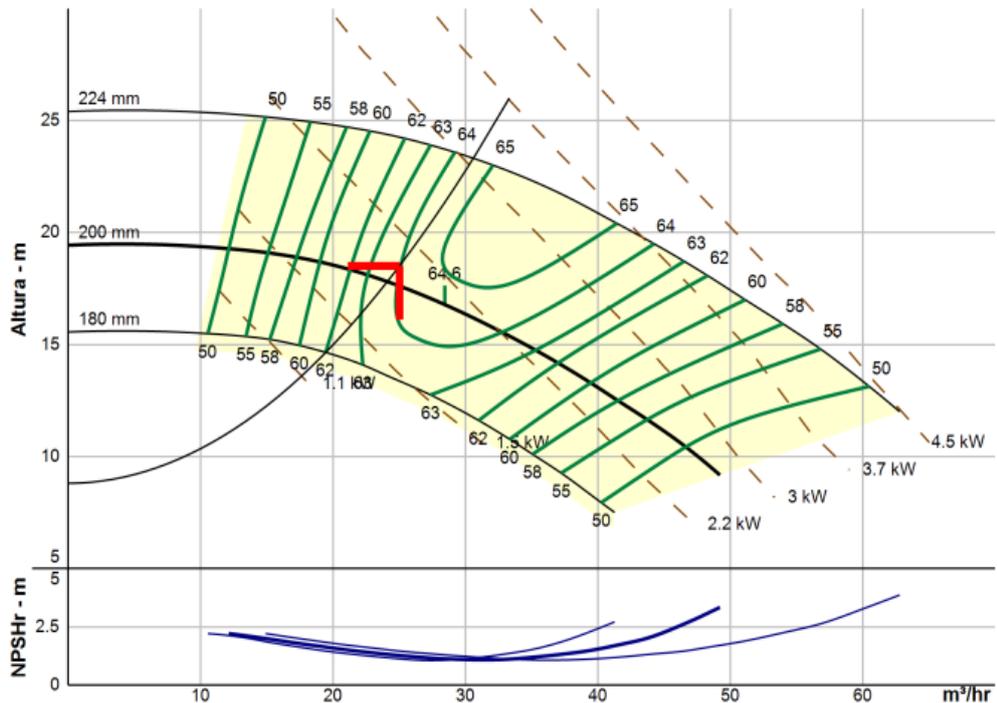


Figura 4.31: Puntos de operación de Hidrostral ISO 2858 - INOX

Evaluación de rendimiento:			
Caudal	Velocidad	Altura	Rendimiento
m ³ /hr	rpm	m	%
30	1740	16.3	64.4
25	1740	17.6	64
20	1740	18.5	60.9
15	1740	19.1	54.8
10	1740	19.3	46.4

c) Ingreso de la bomba Hidrostral ISO 2858 - INOX en el software Pipe Flow Expert. Determinación del punto de operación.

Luego de obtener los puntos de operación de la bomba seleccionada, se ingresaron estos datos en el software de simulación (figura 4.32). En esta ocasión el sistema ya no estará establecido por el caudal de 25 m³/h, sino que ahora se simulará el sistema de transporte de lodo con la bomba seleccionada en la plataforma Pump-Flo, Hidrostral ISO 2858 – INOX y se determinará el punto de operación.

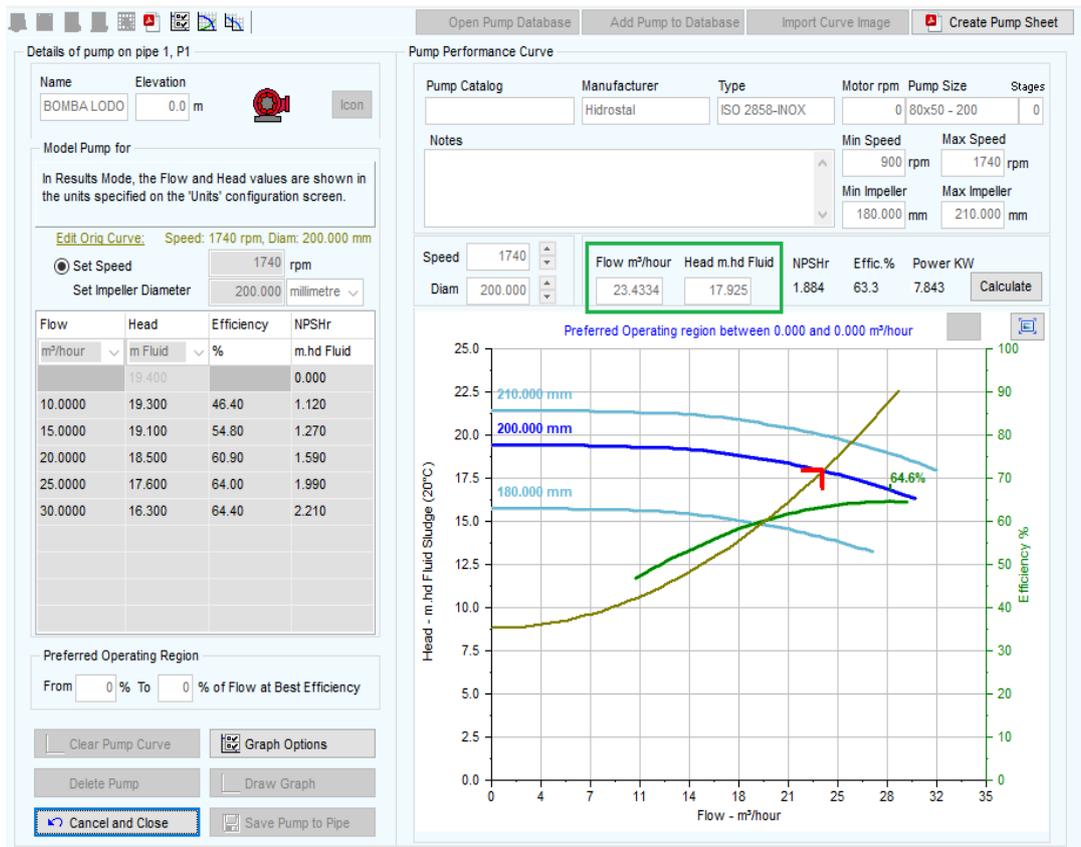
Figura 4.32: Datos de la bomba en software Pipe Flow Expert

The screenshot shows the configuration for a pump named 'BOMBA LODO'. The elevation is set to 0.0 m. The pump model is configured for 'Set Speed' at 1740 rpm and 'Set Impeller Diameter' at 200.000 millimetre. Below the configuration, a table displays the pump's performance characteristics:

Flow	Head	Efficiency	NPSHr
m ³ /hour	m Fluid	%	m.hd Fluid
0	19.400	0	0.000
10.0000	19.300	46.40	1.120
15.0000	19.100	54.80	1.270
20.0000	18.500	60.90	1.590
25.0000	17.600	64.00	1.990
30.0000	16.300	64.40	2.210

Al seleccionar la bomba en la plataforma Pump-Flo se obtuvo la curva característica de la bomba, así como también algunos de sus puntos de operación (figura 4.31). Estos puntos de operación se ingresaron en el software de simulación de tal forma que se graficó la curva característica de la bomba y se interceptó con la curva del sistema de filtrado.

Figura 4.33: Intercepción de la curva de la bomba y del sistema



Con el ingreso de estos datos, el sistema ya se encuentra definido y se puede indicar al software simular el transporte de lodos, luego de unos minutos en donde el software verifica que no falte ningún dato o exista algún error, presenta una tabla de resultados. En la figura 4.34 se muestra la tabla de resultados, en donde se resaltó en un cuadro el punto de operación del sistema con la bomba Hidrostral ISO 2858 – INOX. Esta información completa se puede observar en la ficha de resultados del software, mostrado en el anexo N° 13.

Figura 4.34: Resultados de la simulación

Pipe 1 (P1)
Flow = 23.433 m³/hour
Mass Flow = 6.6395 kg/sec
Velocity = 1.527 m/sec
Length = 2.000 m
Inner Diam = 73.660 mm
Start Elevation = 0.000 m
End Elevation = 0.000 m
Start Pressure = -10.094 kPa.g
End Pressure = 165.725 kPa.g
Total dP Loss = -17.577 m.hd
Elevation Change = 0.000 m
Elevation Change Loss = 0.000 m.hd
Friction Loss = 0.070 m.hd
Entry Fitting Loss = 0.000 m.hd
Exit Fitting Loss = 0.278 m.hd
Pump Suction = -10.094 kPa.g
Pump Discharge = 169.206 kPa.g
Pump Head = 17.925 m.hd
Pump NPSHa = 2.623 m.hd
Pump NPSHr = 1.884 m.hd
Pump Efficiency = 63%

En la figura 4.34 se resalta el punto de operación real del sistema y los valores de NPSH disponible y requerido.

$$Q_{OPERACIÓN} = 23.43 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_{OPERACIÓN} = 17.9 \text{ m}$$

$$NPSH_a > NPSH_r \rightarrow 2.484 \text{ m} > 1.884 \text{ m}$$

Este punto de operación difiere levemente con el valor teórico calculado en la sección 4.6.2.

$$Q_{TEÓRICO} = 23.5 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_{TEÓRICO} = 19.0 \text{ m}$$

Por lo tanto, se concluye que la bomba Hidrostal ISO 2858 – INOX es la indicada para transportar eficazmente el lodo residual **a razón de 23.43 m³/h desde el tanque de lodos hacia el equipo de espesamiento** y con este caudal el sistema de filtrado deberá operar 8.5 horas al día para filtrar 200 m³/día de lodo. (ver Anexo N° 13)

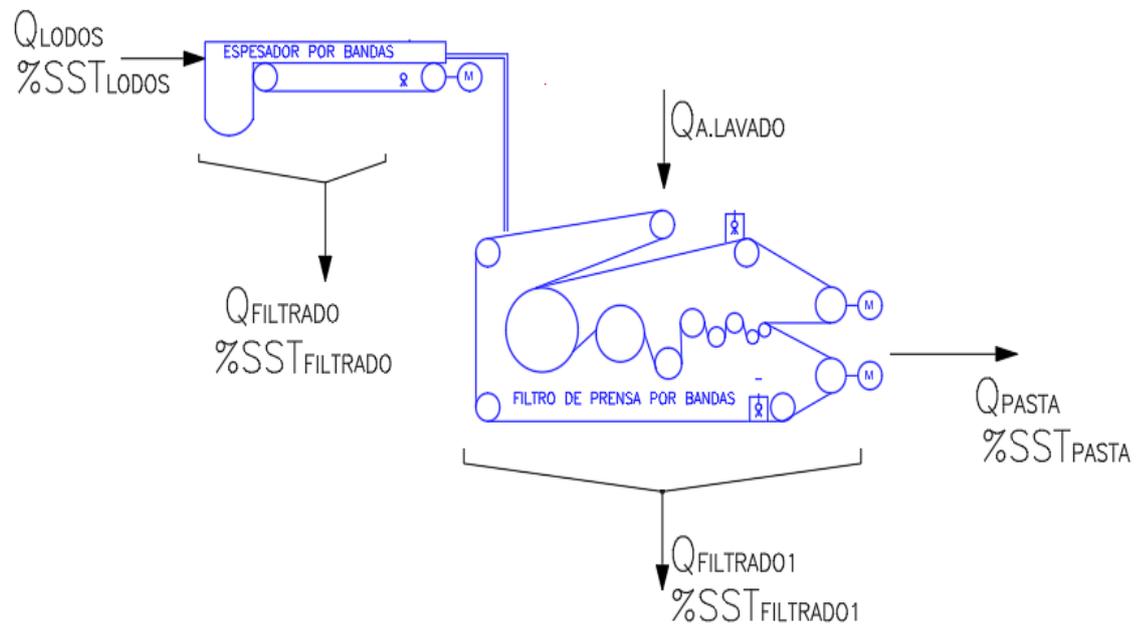
4.6.4 Reutilización de agua con el sistema de filtrado de lodos

El objetivo general de la presente investigación fue: *Diseñar un sistema de filtrado de lodo para optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú en Papelera Reyes S.A.C.*

En esta sección se describe como como se obtuvo el resultado y en cuánto se optimizó la reutilización del agua.

Una vez obtenido el caudal de filtrado del espesador y del filtro de bandas se realiza un balance global para determinar la eficiencia del sistema de filtrado.

Figura 4.35: Balance global de caudal de filtrado



Ingreso al sistema de deshidratación de lodos:

$$Q_{OPERACIÓN} = 23.43 \frac{m^3}{h}$$

Requerimiento de agua clarificada para el lavado de las bandas:

$$Q_{A.LAVADO} = 4.5 \frac{m^3}{h}$$

Con la ecuación 4.4 y 4.5 se calcula nuevamente el caudal filtrado en el espesador de gravedad y por ende, también se ve afectado el caudal filtrado en el filtro de bandas. Se obtuvo el caudal filtrado total de ambos equipos:

$$Q_{FILTRADOTOTAL} = Q_{FILTRADO} + Q_{FILTRADO1}$$

$$Q_{FILTRADOTOTAL} = 26.9 \frac{m^3}{h}$$

Salida de lodo deshidratado del sistema de deshidratación de lodos:

$$Q_{PASTA} = 1.03 \frac{m^3}{h}$$

De aquí se puede obtener la eficiencia del sistema de filtrado de lodos, en lo que se refiere a filtrado de agua obtenido:

$$\% \eta_{FILTRADO} = \frac{Q_{FILTRADOTOTAL} - Q_{A.LAVADO}}{Q_{LODOS}} = \frac{26.9 - 4.5}{23.43}$$

$$\% \eta_{FILTRADO} = 95.6 \%$$

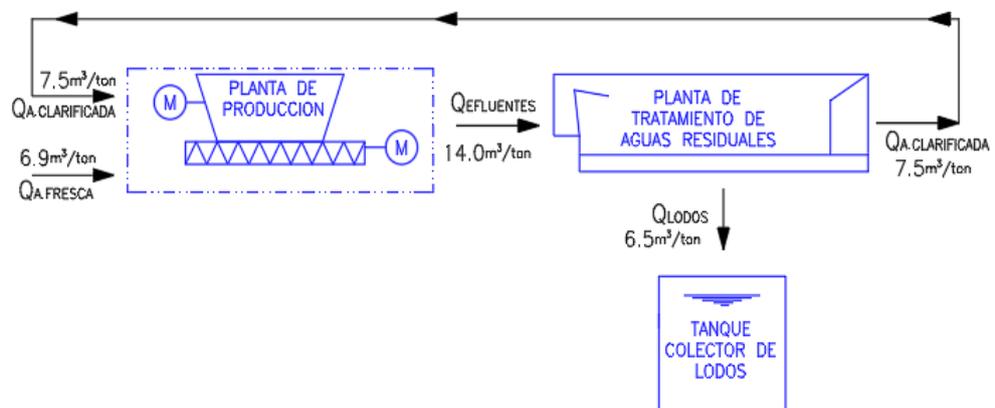
Se tiene como objetivo principal del presente trabajo de investigación: Diseñar un sistema de filtrado de lodo para optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú en Papelera Reyes S.A.C. Por lo que, a continuación se presentará un balance global de producción y consumo de agua, antes y después de la implementación del sistema de filtrado. Para esto, se está tomando la información provista por Papelera Reyes S.A.C en su informe técnico sustentatorio presentado al Ministerio Público en el año 2024, en dónde se detallan datos de producción y consumo de energía dentro del período 2023, y se exponen a continuación:

- El consumo de agua fresca fue en promedio 6.9 m³ por tonelada de bobina de papel.
- La eficiencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, en cuánto a reutilización de agua, fue en promedio 53.5 %.

- La producción de bobinas de papel fue en promedio de 1.28 ton/h.
- En promedio, se necesitan 14.4 m³ de agua para producir 1 tonelada de bobina de papel.
- Cada tonelada de bobina de papel consumió en promedio 400 litros de agua.

En base a esta información, se presenta el balance de flujos de consumo de agua en la planta de producción de papel Tisú y se determina cuánto se reutiliza de agua actualmente.

Figura 4.36: Balance de flujos de consumo sin sistema de filtrado de lodos



De la figura, se puede obtener el porcentaje de reutilización de agua en la actualidad:

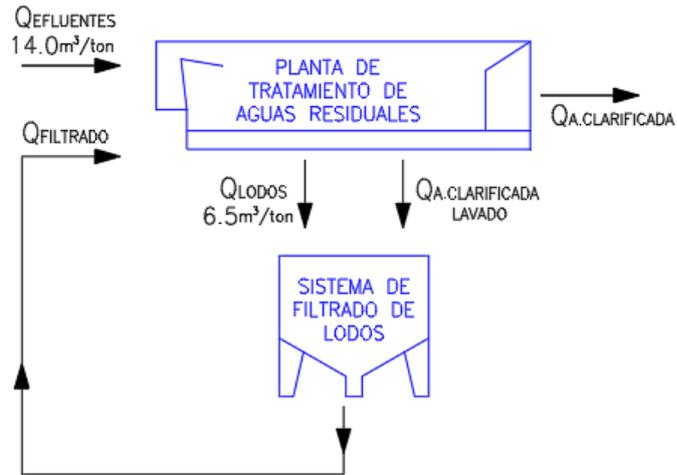
$$\% \text{ Reutilización} = \frac{\text{Consumo de agua clarificada}}{\text{Consumo total por tonelada de papel}}$$

$$\% \text{ Reutilización} = \frac{7.5}{14.4} = 52.0 \%$$

Es decir, de 14.4 m³ de agua que se utiliza en la producción de una tonelada bobina de papel, el 52% proviene de agua que se ha tratado en la PTARI de Papelera Reyes S.A.C, y sólo el 48% se compra a SEDAPAL.

Ahora se verá el balance de flujos de consumo de agua con la implementación del sistema de filtrado de lodo. Para ello, primero se presenta como influye el sistema de filtrado en la PTAR.

Figura 4.37: Balance de flujos con la implementación del sistema de filtrado



Para el sistema de filtrado de lodo se utiliza agua clarificada en la limpieza de las bandas. De la hoja de datos técnicos del equipo se obtuvo que es necesario $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ durante el periodo de funcionamiento del sistema de 8.5 horas. Se llevará este término a toneladas por hora tomando en cuenta una producción de 24 horas.

$$Q_{A.LAVADO} = \frac{(Q'_{A.LAVADO} * 8.5 \text{ horas}) / 24}{\text{Producción}} = \frac{1.6 \text{ m}^3/\text{h}}{1.28 \text{ ton/h}}$$

$$Q_{A.LAVADO} = 1.25 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}}$$

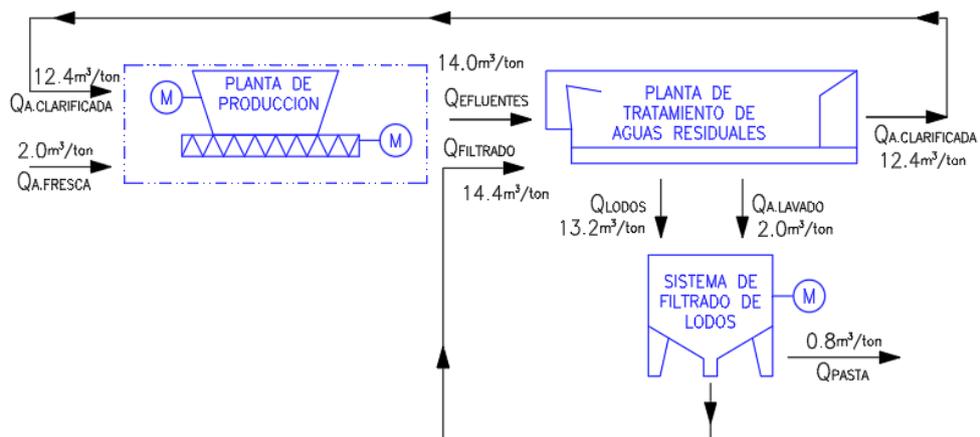
Se conoce que a la salida del sistema de filtrado de lodos, se tiene un caudal de filtrado de $26.9 \text{ m}^3/\text{h}$ en el sistema de filtrado de lodos. Se llevará este término a toneladas por hora en la planta de producción tomando en cuenta una producción de 24 horas.

$$Q_{FILTRADO} = \frac{(Q''_{FILTRADO} * 8.5 \text{ horas}) / 24}{Producción} = \frac{9.52 \text{ m}^3/h}{1.28 \text{ ton/h}}$$

$$Q_{filtrado} = 7.44 \frac{\text{m}^3}{\text{ton}}$$

Por lo que ahora ingresaría 21.44 m³/ton a la PTAR, sin embargo, se obtiene un mayor flujo de lodos y a la vez un mayor filtrado. Para resolver esta iteración sucesiva se realizó una ecuación de balances de flujo tomando en cuenta la eficiencia de la PTAR y del sistema de filtrado, obteniéndose un equilibrio. El balance de flujos global con la implementación del sistema de filtrado se presenta en la siguiente figura.

Figura 4.38: Balance de flujos de consumo con sistema de filtrado de lodos



Con la implementación del sistema de filtrado de lodos, el caudal de lodo que ingresa al sistema de filtrado es de 13.2 m³/ton, es por este motivo que se seleccionó un tanque de lodos que pueda amortiguar estas fluctuaciones de suministro de lodo de la PTAR, a su vez el sistema de filtrado de lodos tendrá que operar 16 horas diarias para poder procesar dicho caudal. Con esto, las capacidades de los equipos seleccionados no tendrán que cambiarse.

De la figura 4.38, se puede obtener el porcentaje de reutilización de agua con la implementación del sistema de filtrado de lodos.

$$\% \text{ Reutilización} = \frac{\text{Consumo de agua clarificada}}{\text{Consumo total por tonelada de papel}}$$

$$\% \text{ Reutilización} = \frac{12.4}{14.4} = 86.1 \%$$

Es decir, de 14.4 m³ de agua que se utiliza en la producción de una tonelada bobina de papel, el 86.1% proviene de agua que se ha tratado en la PTAR de Papelera Reyes S.A.C, y sólo el 13.9% se compra a SEDAPAL.

Respondiendo al objetivo principal del presente proyecto de investigación: **Se optimizó la reutilización de agua para la producción de papel Tisú, pasando de utilizar 7.5 m³ a 12.4 m³ de agua clarificada en la producción de 1 tonelada de bobina de papel. Llevándolo a términos de porcentaje, con la implementación del sistema de filtrado de lodos, ahora se reutiliza el 86.1% del agua, 34.1% más que el inicial (52%).**

4.7. Aspectos éticos en Investigación

Para el desarrollo del proyecto de investigación se cumplirá con el código de ética del investigador de la Universidad Nacional del Callao establecidos en el artículo N° 8 de los principios éticos del investigador según fue aprobado por Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU- 16 de julio de 2019.

V. RESULTADOS

Se identificó la procedencia del lodo, encontrando que el lodo proviene de dos fuentes, la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) y la celda de destintado, siendo la PTAR la fuente de mayor significancia ya que la celda de destintado solo está operativa cuando la planta procesa fibra de papel reciclado. Como se muestra en la figura 5.1, este lodo se almacena en el “tanque colector de lodos” y es a la salida de este de donde se tomaron las muestras para caracterizar y cuantificar el lodo.

Se obtuvieron las características del lodo en colaboración con el Laboratorio Hidrolab S.A.C. En la tabla 5.1 se muestran las principales características que se utilizaron en el desarrollo de la investigación. En el anexo N° 4, se presenta el reporte del laboratorio donde se presentan todas las propiedades físicas y químicas del lodo.

Figura 5.1: Fuentes generadoras de lodo residual

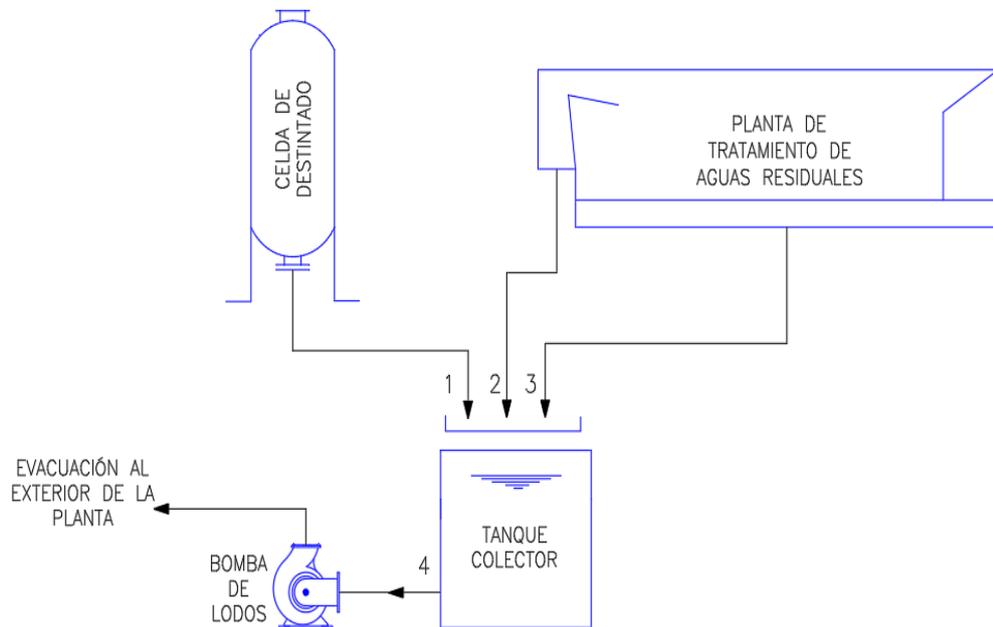


Tabla 5.1: Principales parámetros del lodo de Papelera Reyes S.A.C

PARÁMETRO	MUESTRAS				PROMEDIO
HUMEDAD (% en masa)	98.54	98.64	99.03	97.79	98.5
DENSIDAD (Kg/m³)	1010	1025	1015	1030	1020
SOLIDOS TOTALES (%m)	1.42	1.62	1.51	1.48	1.50
VISCOSIDAD (Kg/m.s)	0.0025	0.0008	0.0015	0.002	0.0017

Fuente: Informe de Laboratorio Hidrolab S.A.C, Anexo N° 4 (2024)

Para determinar la cantidad de lodo producido se tomaron los datos del área de logística (tabla 4.2 y figura 4.4). Determinando la cantidad de lodo producido al día:

$$Q_{LODO\ GENERADO} = 200\ m^3/día$$

Por otro lado, la selección de los equipos que componen el sistema de filtrado de lodos se realizó en base a textos y guías de selección de fabricantes, tales como “Manual de bombeo de aguas residuales” (Grundfos, 2021), “Diseño de tratamiento y disposición de lodos” (CONAGUA, 2015) y el texto “Ingeniería de aguas residuales” (Metcalf y Eddy, 2010).

En la tabla 5.2 se presenta los equipos seleccionados que componen el sistema de filtrado de lodo, el procedimiento de la selección se presentó en la sección 4.6 de la presente tesis. En la figura 5.2 se muestra un esquema en 3D del sistema de filtrado de lodos diseñado en el software AutoCAD 3D Max donde se señalan cada uno de los componentes, las vistas se encuentran en el anexo N° 15, N° 16 y N° 17.

Tabla 5.2: Equipos seleccionados para el sistema de filtrado de lodo

EQUIPO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MEDIDA	UNIDAD
MESA DE GRAVEDAD	1	Modelo	PDXL-1000-B	
		Ancho de banda	1000	mm
		Velocidad de banda	4.1-15.1	m/min
		Caudal	40	m3/h
		Dimensiones	4725X2855X1370	mm
		Material	Acero Inoxidable 304L	-
FILTRO DE PRENSA TIPO BANDA	1	Modelo	PPS11-1500-B	-
		Ancho de banda	1500	mm
		Velocidad de banda	1.2-4.4	m/min
		Caudal	5.0-15.0	m3/h
		Caudal de agua de lavado	3.0-	m3/h
		Material	AISI304	-
AGITADOR DE LODOS	1	Serie	HPS-Horizontal	-
		Volumen	10-500	m3
		Velocidad	100 - 300	rpm
		Potencia	1.5-45	kW
		Tipo de álabe	Helicoidal tipo S	-
		Diámetro de hélice	200-1500	mm
BOMBA DE LODO	1	Longitud máxima del eje	2000	mm
		Modelo	ISO 2858 - INOX	-
		Potencia nominal	7.5	kW
TANQUES DE ALMACENAMIENTO	1	Velocidad	1740	rpm
	1	Rotoplas R40	250	l
	1	Rotoplas R40	400	l
BOMBAS DE POLÍMERO	2	Rotoplas R40	500	l
AGITADORES	3	Doble diagrama Wilden PRO - FLO	0.25	HP
CODOS	2	Savinobarvera AR30	0.12	kW
CODOS	2	Codo de 90° ASTM A182 F304	3"	pulg
CODOS	2	Codo de 45° ASTM A182 F304	3"	pulg
VALVULAS	2	Válvulas de compuerta 3"	3"	pulg
MANOMETROS	2	Válvula de pie con filtro	3"	pulg
VALVULAS	1	Yk-150f	3"	pulg
TUBOS	4	Tubo de 3" SCH 40 de acero inoxidable	6x3"	pulg
VALVULA	1	Válvula check	3"	pulg
MANO DE OBRA	3	Técnicos mecánicos	40	día
	1	Ing. Sanitario	40	día
	1	Ing. Mecánico	40	día

Figura 5.2: Diseño en 3D del sistema de filtrado de lodos

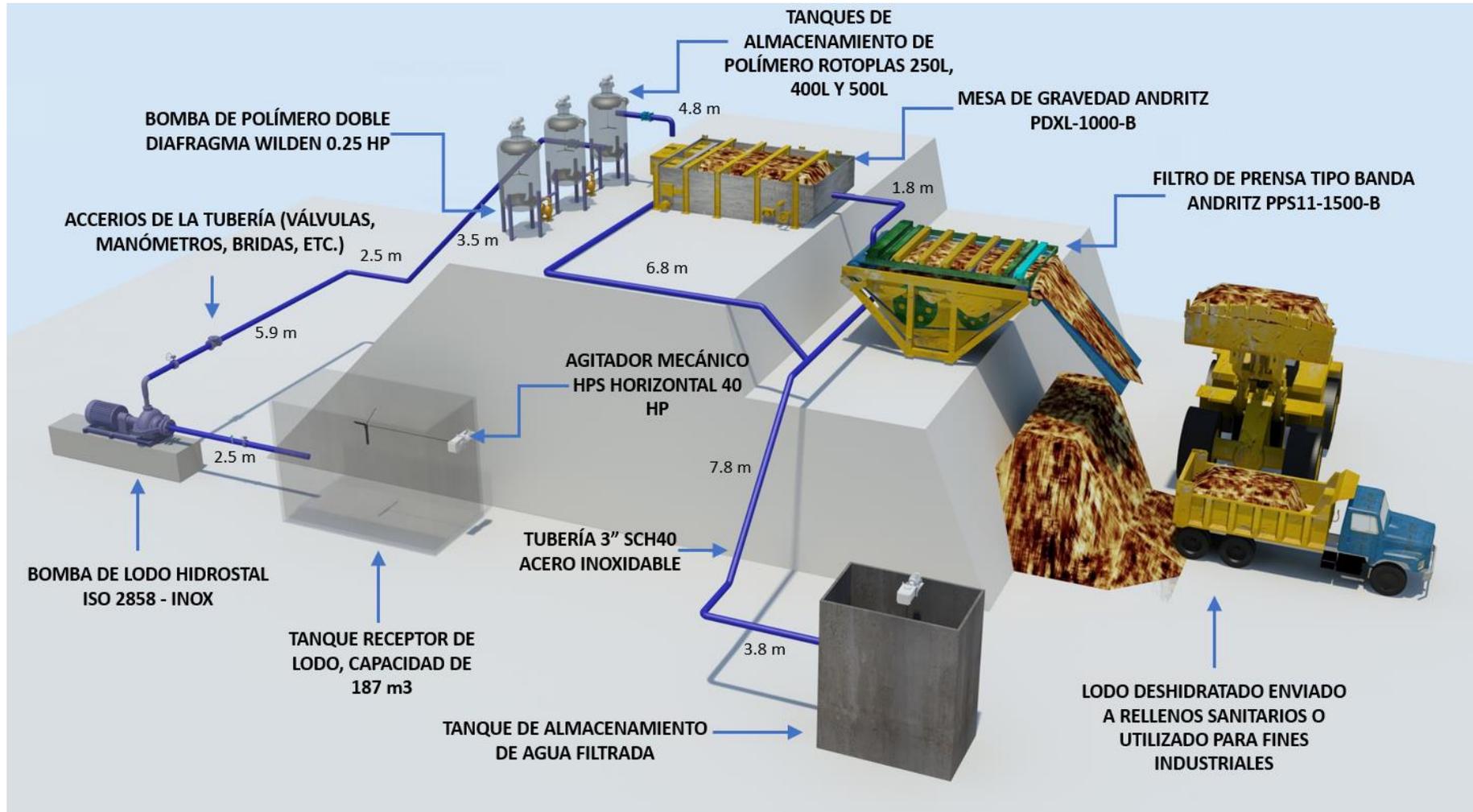
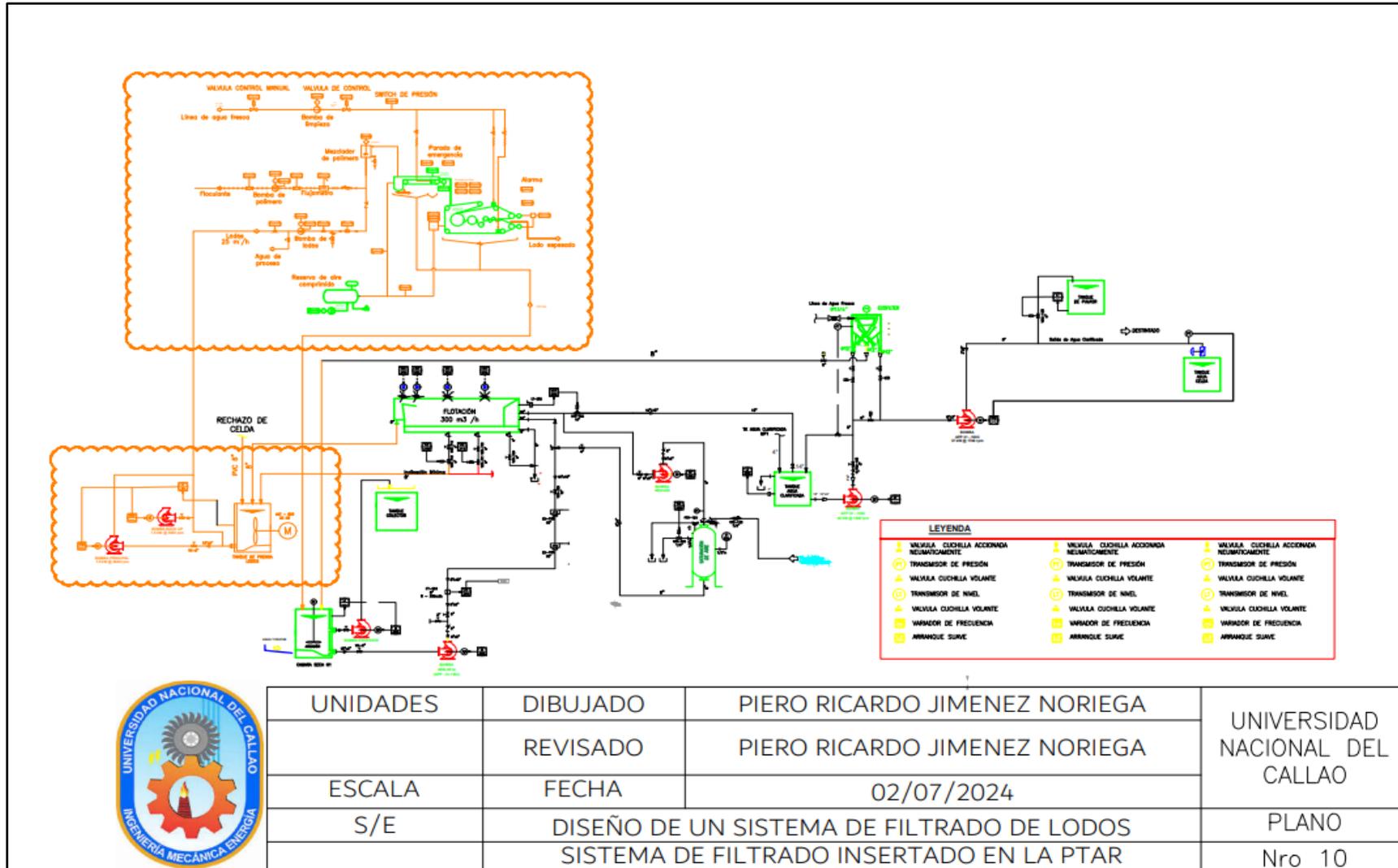


Figura 5.3: Sistema de filtrado insertado en la PTAR

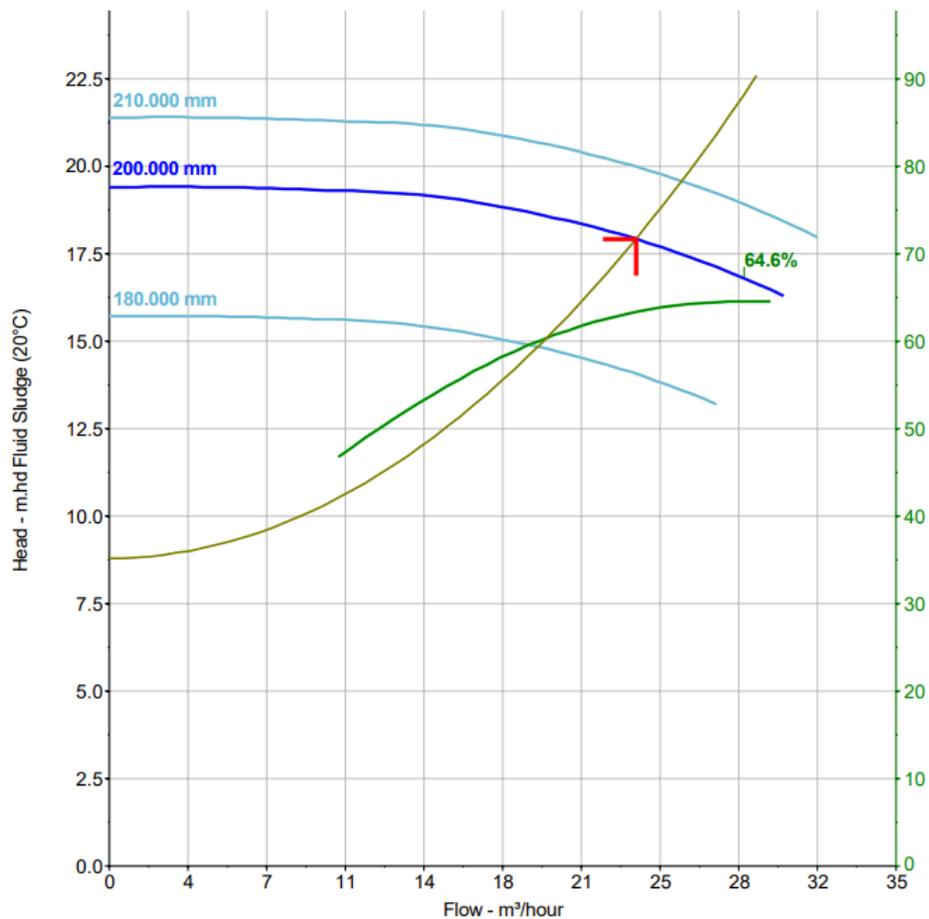


A su vez, se simuló el transporte del lodo a través de los componentes del sistema de filtrado (desde el tanque de lodos hasta el equipo de espesamiento como se muestra en la figura 4.21) con el software Pipe Flow Expert V 7.40 como se detalló en la sección 4.6.3.

Se determinó que la bomba Hidrostral ISO 2858 – INOX traslada eficientemente el lodo a través del sistema.

El software Pipe Flow Expert interceptó la curva del sistema y la curva característica de la bomba (figura 5.4). Además, brindó una hoja de resultados (Anexo N° 13) en dónde se presenta, entre otros datos, el punto de operación real del sistema.

Figura 5.4: Punto de operación con la bomba Hidrostral ISO 2858 – INOX



A continuación se presenta un resumen de resultados que muestra el software luego de realizar la simulación, en la figura 5.5 se resaltó en un cuadro los datos que son especialmente útiles para continuar con la investigación.

Figura 5.5: Resumen de resultados de la simulación

```

Pipe 1 (P1)
Flow = 23.433 m³/hour
Mass Flow = 6.6395 kg/sec
Velocity = 1.527 m/sec
Length = 2.000 m
Inner Diam = 73.660 mm
Start Elevation = 0.000 m
End Elevation = 0.000 m
Start Pressure = -10.094 kPa.g
End Pressure = 165.725 kPa.g
Total dP Loss = -17.577 m.hd
Elevation Change = 0.000 m
Elevation Change Loss = 0.000 m.hd
Friction Loss = 0.070 m.hd
Entry Fitting Loss = 0.000 m.hd
Exit Fitting Loss = 0.278 m.hd
Pump Suction = -10.094 kPa.g
Pump Discharge = 169.206 kPa.g
Pump Head = 17.925 m.hd
Pump NPSHa = 2.623 m.hd
Pump NPSHr = 1.884 m.hd
Pump Efficiency = 63%
    
```

De la figura 5.5 se obtiene que el punto de operación del sistema operando con la bomba Hidrostal ISO 2858 – INOX es:

$$Q_{OPERACIÓN} = 23.43 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$H_{OPERACIÓN} = 17.9 \text{ m}$$

$$NPSH_a > NPSH_r \rightarrow 2.484 \text{ m} > 1.884 \text{ m}$$

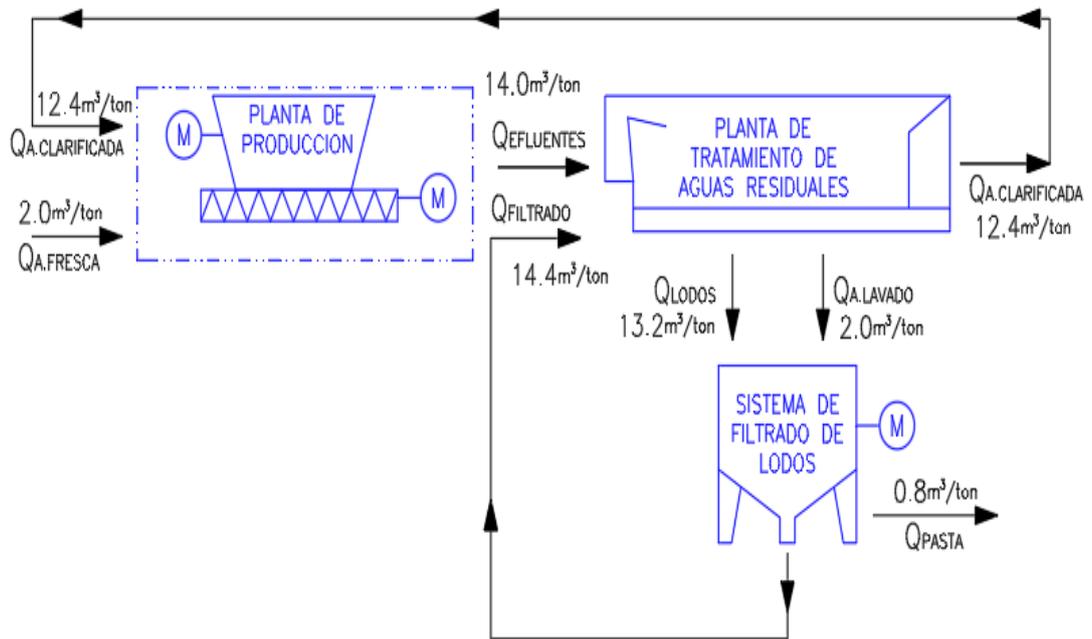
Con esta simulación se garantizó que el sistema de filtrado procesará 23.43 m³/h de lodo. También permitió determinar que el sistema de filtrado necesita estar operando 8.5 horas al día para procesar 200 m³ diarios de lodo que se generan en producción.

Además, con este resultado se pudo determinar la cantidad de agua filtrada y en cuánto se optimiza la reutilización de agua en producción. Este procedimiento se detalló en la sección 4.6 y se mostrará en el resultado general a continuación.

Además, en la sección 4.6.2 se describió en cuanto se optimiza la reutilización del agua en la producción de papel Tisú con la implementación del sistema de filtrado de lodos.

El balance de flujos global con la implementación del sistema de filtrado se presenta en la siguiente figura.

Figura 5.6: Balance de flujos de consumo con sistema de filtrado de lodos



Con la implementación del sistema de filtrado de lodos, el caudal de lodo que ingresa al sistema de filtrado es de $13.2 \text{ m}^3/\text{ton}$, es decir, 405 m^3 de lodo al día, el doble del que se había obtenido inicialmente (200 m^3 de lodo al día) esto es debido a que el sistema de filtrado genera más agua que procesar y por ende más lodo. Luego de realizar un balance de flujos se obtuvieron los caudales que se muestran en la figura 5.6.

Bajo este resultado, se determinó que el sistema de filtrado de lodos tendrá que operar 16 horas diarias para poder procesar dicho caudal. Con esto, las capacidades de los equipos seleccionados no tendrán que cambiarse.

De la figura 5.6, se puede obtener el porcentaje de reutilización de agua con la implementación del sistema de filtrado de lodos.

$$\% \text{ Reutilización} = \frac{\text{Consumo de agua clarificada}}{\text{Consumo total por tonelada de papel}}$$

$$\% \text{ Reutilización} = \frac{12.4}{14.4} = \mathbf{86.1 \%}$$

Es decir, de 14.4 m³ de agua que se utiliza en la producción de una tonelada bobina de papel, el 86.1% proviene de agua que se ha tratado en la PTAR de Papelera Reyes S.A.C, y sólo el 13.9% se compra a SEDAPAL. Se optimizó la reutilización de agua para la producción de papel Tisú, pasando de utilizar 7.5 m³ a 12.4 m³ de agua clarificada en la producción de 1 tonelada de bobina de papel. Llevándolo a términos de porcentaje, con la implementación del sistema de filtrado de lodos en Papelera Reyes S.A.C, se reutilizará el 86.1% del agua, 34.1% más que el inicial (52%).

Con la intención de verificar la viabilidad económica del proyecto, se realizó una estimación de la inversión a realizar para la implementación del sistema de filtrados de lodos en Papelera Reyes S.A.C. En la tabla 5.3 se puede apreciar el costo unitario de cada equipo seleccionado en la presente investigación, al sumar también el costo de mano de obra, se obtiene el costo total de inversión.

El costo total para implementar el sistema de filtrado de lodos es:

$$\text{Costo de inversión} = \mathbf{S/ 540,768.75}$$

Tabla 5.3: Inversión del sistema de filtrado de lodos

EQUIPO	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MEDIDA	UNIDAD	P/U (\$)	COSTO TOTAL (\$)	COSTO TOTAL (\$/)
MESA DE GRAVEDAD	1	Modelo	PDXL-1000-B		1600	1600	6000
		Ancho de banda	1000	mm			
		Velocidad de banda	4.1-15.1	m/min			
		Caudal	40	m3/h			
		Dimensiones	4725X2855X1370	mm			
		Material	Acero Inoxidable 304L	-			
FILTRO DE BANDA MECÁNICA	1	Modelo	PPS11-1500-B	-	132000	132000	495000
		Ancho de banda	1500	mm			
		Velocidad de banda	1.2-4.4	m/min			
		Caudal	5.0-15.0	m3/h			
		Caudal de agua de lavado	3.0-	m3/h			
		Material	AISI304	-			
AGITADOR DE LODOS	1	Serie	HPS-Horizontal	-	1500	1500	5625
		Volumen	10-500	m3			
		Velocidad	100 - 300	rpm			
		Potencia	1.5-45	kw			
		Tipo de álabe	Helicoidal tipo S	-			
		Diámetro de hélice	200-1500	mm			
		Longitud del eje	2000	mm			
BOMBA DE LODO	1	Modelo	ISO 2858 - INOX	-	1750	1750	6562.5
		Potencia nominal	7.5	kW			
		Velocidad	1740	rpm			
TANQUES DE ALMACENAMIENTO	1	Rotoplas R40	250	l	70	70	262.5
	1	Rotoplas R40	400	l	85	85	318.75
	1	Rotoplas R40	500	l	108	108	405
BOMBAS DE POLÍMERO	2	Doble diafragma Wilden	0.25	HP	150	300	1125
AGITADORES	3	Savinobarbera AR30	0.12	kW	500	1500	5625
CODOS	2	90° ASTM A182 F304	3"	pulg	10	20	75
CODOS	2	45° ASTM A182 F304	3"	pulg	7	14	52.5
VALVULAS	2	Válvula de compuerta 3"	3"	pulg	7	14	52.5
MANOMETROS	2	Yk-150f	3"	pulg	800	1600	6000
VALVULAS	1	Válvula pie con filtro	3"	pulg	80	80	300
TUBOS	4	Tubo 3" SCH 40 de acero inox.	6x3"	pulg	126	504	1890
VALVULA	1	Válvula check	3"	pulg	60	60	225
MANO DE OBRA	3	Técnicos mecánicos	40	día	700	2100	7875
	1	Ing. Sanitario	40	día	1000	1000	3750
	1	Ing. Mecánico	40	día	1500	1500	5625
MONTO TOTAL						144 205	540 768

Esta inversión inicial se recuperará en un determinado tiempo, pues con el sistema de filtrado de lodo, el consumo de agua mensual se verá disminuido como se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Consumo de agua industrial con y sin sistema de filtrado

	Sin sistema de filtrado de lodos	Con sistema de filtrado de lodos
Consumo de agua fresca por tonelada de bobina de papel	6.9 m ³ /ton	2.0 m ³ /ton
Producción mensual de bobina de papel	921.6 ton/mes	921.6 ton/mes
Consumo de agua fresca por mes	6359 m³/mes	1843.2 m³/mes

El ahorro en volumen consumido de agua que se produce a lo largo de un mes esta dado por:

$$Ahorro\ mensual = 6359.0\ m^3/mes - 1843.2\ m^3/mes$$

$$Ahorro\ mensual = 4515.8\ m^3/mes$$

De la estructura tarifaria brindada por SEDAPAL (ANEXO N° 14), se obtiene que el precio por metro cúbico de agua industrial es 7.84 S/. /m³.

Por lo tanto, el ahorro económico mensual esta dado por:

$$Ahorro\ económico\ mensual = 4515.8\ \frac{m^3}{mes} \times 7.84\ \frac{S/}{m^3}$$

$$Ahorro\ económico\ mensual = S/ \quad 35,403.87$$

Se realizó una proyección a lo largo de los meses, encontrando que luego de 16 meses se logra recuperar la inversión realizada, según la tabla 5.5.

Tabla 5.5: Proyección ahorro en consumo de agua para 16 meses

MES	VOLUMEN (m ³)	TARIFA		AHORRO(S)
1	4515.8	7.84	S/	35,403.87
2	4515.8	7.84	S/	70,807.74
3	4515.8	7.84	S/	106,211.62
4	4515.8	7.84	S/	141,615.49
5	4515.8	7.84	S/	177,019.36
6	4515.8	7.84	S/	212,423.23
7	4515.8	7.84	S/	247,827.10
8	4515.8	7.84	S/	283,230.98
9	4515.8	7.84	S/	318,634.85
10	4515.8	7.84	S/	354,038.72
11	4515.8	7.84	S/	389,442.59
12	4515.8	7.84	S/	424,846.46
13	4515.8	7.84	S/	460,250.34
14	4515.8	7.84	S/	495,654.21
15	4515.8	7.84	S/	531,058.08
16	4515.8	7.84	S/	566,461.95
AHORRO TOTAL			S/	566,461.95

Luego de 16 meses posterior a la implementación del sistema de filtrado de lodos, la empresa Papelera Reyes S.A.C habrá cubierto la inversión inicial (S/ 540,768.75) y de ahí en adelante, la empresa ahorrará en sus gastos energéticos el monto de S/ 35,403.87 cada mes.

VI. DISCUSIONES DE RESULTADOS

6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

- Con referencia a la hipótesis general

Se planteó que: El diseño de un sistema de filtrado de lodos en base a manuales técnicos, procedimientos estandarizados y software de ingeniería, optimiza la reutilización de agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C.

De acuerdo a la hipótesis general se comprobó que el sistema de filtrado mostrado en la figura 5.2 (pp. 123) diseñado en base a textos y guías de selección de fabricantes, tales como “Manual de bombeo de aguas residuales” (Grundfos, 2021), “Diseño de tratamiento y disposición de lodos” (CONAGUA, 2015) y el texto “Ingeniería de aguas residuales” (Metcalf y Eddy, 2010). Logró optimizar la reutilización de agua para la producción de papel Tisú, pasando de utilizar 7.5 m³ a 12.4 m³ de agua clarificada (agua filtrada) en la producción de 1 tonelada de bobina de papel. Llevándolo a términos de porcentaje, con el diseño del sistema de filtrado de lodos, se reutilizará el 86.1% del agua, 34.1% más que el inicial (52%). (ver pp. 128)

Por lo que la hipótesis planteada es aceptada.

- Con referencia a las hipótesis específicas

- H1: Se planteó que utilizando ensayos estandarizados y datos logísticos, se caracteriza y cuantifica el lodo generado en la producción de papel Tisú.

De acuerdo a la hipótesis específica 1 se comprobó que utilizando ensayos estandarizados como el método Nefelométrico, método de extracción Soxhlet realizados por el laboratorio Hidrolab S.A.C (Anexo N° 4) y tomando datos del área de logística de la empresa Papelera Reyes S.A.C, se pudo obtener las características y cantidad de lodo que

genera la producción de papel Tisú. Las cuáles se muestran en la tabla 5.1. (ver pp. 120 y 121)

Por lo que la hipótesis planteada es aceptada.

- H2: Se planteó que la elaboración de cálculos de diseño y selección en base a manuales técnicos, permite el dimensionamiento y selección de los componentes del sistema de filtrado de lodo.

De acuerdo a la hipótesis específica 2 se comprobó que realizando los cálculos en base a textos y guías de selección de fabricantes, tales como “Manual de bombeo de aguas residuales” (Grundfos, 2021), “Diseño de tratamiento y disposición de lodos” (CONAGUA, 2015) y el texto “Ingeniería de aguas residuales” (Metcalf y Eddy, 2010). Se dimensionó y seleccionó los componentes del sistema mostrados en la figura 5.2 y tabla 5.2. (pp. 122, 123 y 124)

Por lo que la hipótesis planteada es aceptada.

- H3: Se planteó que el cálculo hidráulico con el software Pipe Flow Expert V7.40 simula el transporte del lodo a través del sistema de filtrado.

De acuerdo a la hipótesis específica 3 se comprobó que el cálculo hidráulico utilizando el software Pipe Flow Expert simuló el transporte del lodo a través del sistema de filtrado desde el tanque de lodos hasta el equipo de espesamiento. Con esta simulación se pudo obtener el caudal real de operación que circula a través del sistema, lo cual nos permitió obtener el porcentaje real de filtrado que se obtiene del sistema. Estos datos se pueden observar en la figura 5.5. ver pp. 125 y 126)

Por lo que la hipótesis planteada es aceptada.

6.2. Contratación de los resultados con otros estudios similares

- **En el área internacional**

En la tesis de Pinzón (2022), *Diseño de una planta de deshidratación y secado de lodos industriales provenientes del proceso de enfriamiento de un horno incinerador de la empresa PROSARC S.A ESP*, la humedad de su lodo es del 93.43%, además presentó residuos biológicos. Por estos motivos su diseño del sistema de tratamiento de lodos contrasta con el de la presente tesis, pues Pinzón seleccionó como equipo deshidratador un tornillo prensa, ya que este está en la capacidad de deshidratar y secar lodos que se encuentren entre 90% - 95% de humedad. Con este equipo, el autor demostró que se logrará reducir el volumen del lodo hacia un 83%, dando un reaprovechamiento al agua y al sólido deshidratado, logrando los propósitos de la empresa.

En la tesis de Pinzón se realizó también un análisis económico de recuperación de la inversión, determinando que es viable implementar el proyecto ya que a pesar que su inversión inicial es alta, esta se recupera en 5 años, y luego la empresa estará ahorrando \$18.889.000 anuales.

- **En el área nacional**

En el artículo de Cucho (2019), "Reutilización del agua mediante el sistema de deshidratación de lodos (MacTube), en el proyecto Hilarión", se implementó el sistema de tratamiento denominado MacTube para la deshidratación del lodo generado en la actividad de perforación del proyecto minero Hilarión. En este tipo de sistema de deshidratación, se seleccionó el coagulante MT-8834, mezcla de Poliaminas Catiónicas en contraste con el Polímero Catiónico de alto peso molecular seleccionado en la presente tesis. Esta diferencia se debe a las características del lodo en cuestión, pues en el proyecto Hilarión se genera un lodo con un alto contenido de metales pesados, en contraste con el lodo generado en la industria papelera. Por otro lado, en el artículo de Cucho (2019) se utilizó como equipo deshidratador el MacTube W17.10 y una de las diferencias con el filtro prensa tipo bandas, es que este último es de funcionamiento

continuo, a diferencia del equipo MacTube en donde el llenado de lodos es intermitente.

Por último, el autor menciona que la aplicación del sistema MacTube permitió recuperar el agua contenida en el lodo producto de la perforación diamantina en 85%, un valor inferior al 95% de eficiencia que presenta el diseño de sistema de filtrado de lodos en la presente tesis. La baja eficiencia del sistema MacTube se puede justificar porque este equipo deshidratador está pensado en una funcionalidad “portátil” ya que una vez terminado el proyecto de perforación, debe trasladarse a otro. Es por este motivo, que este equipo deshidratador no está complementado de un equipo de espesamiento, lo que disminuye la eficiencia del sistema de tratamiento de lodos.

6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigentes

Los autores de la presente investigación, Jimenez Noriega Piero Ricardo, identificado con número DNI 73808866, Cisa Regalado Julio Davis identificado con número DNI 45481608 y Zavala Rivera Christian André identificado con número DNI 47133575 declaran bajo juramento que todo el contenido de esta tesis es veraz, auténtico y cumplen con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao.

VII. CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema de filtrado de lodo, el cual se puede apreciar en la figura 5.2, figura 5.3 y en la tabla 5.4. (pp. 122, 123 y 124)

Este sistema de filtrado logró optimizar la reutilización de agua para la producción de papel Tisú, pasando de utilizar 7.5 m³ a 12.4 m³ de agua clarificada (agua filtrada) en la producción de 1 tonelada de bobina de papel. Llevándolo a términos de porcentaje, con la implementación del sistema de filtrado de lodos en Papelera Reyes S.A.C, se reutilizará el 86.1% del agua, 34.1% más que el inicial (52.0%). (ver pp. 127 y 128)

- Con el apoyo del laboratorio Hidrolab S.A.C se determinaron las características del lodo generado en la producción de papel Tisú, estas se pueden apreciar en el Anexo N° 4 del presente documento. Entre las propiedades que se determinaron se puede mencionar que la humedad de lodo es de 98.50% en masa y la cantidad de sólidos totales es del 1.5% en masa.

Por otro lado, tomando datos del área de logística de la empresa Papelera Reyes S.A.C, se obtuvo que se generan 200 m³ de lodo al día, procedente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) y de la celda de destintado.

- Se dimensionó y seleccionó los componentes del sistema de filtrado de lodos en base a textos y guías de selección de fabricantes, tales como “Manual de bombeo de aguas residuales” (Grundfos, 2021), “Diseño de tratamiento y disposición de lodos” (CONAGUA, 2015) y el texto “Ingeniería de aguas residuales” (Metcalf y Eddy, 2010).

En la tabla 5.2 se presenta los equipos seleccionados que componen el sistema de filtrado de lodo.

Así mismo, en la figura 5.2 se muestra un esquema del sistema de filtrado de lodos donde se señala cada uno de los componentes seleccionados. (ver pp. 123 y 124)

- Se simuló el transporte del lodo a través de los componentes del sistema de filtrado con el software Pipe Flow Expert V7.40.
Se determinó que la bomba Hidrostral ISO 2858 – INOX es la indicada para transportar eficazmente el lodo residual desde el tanque de lodos hacia el equipo de espesamiento. Se obtuvo el caudal real de operación que circula a través del sistema, 23.43 m³/h.
Esto permitió conocer que el caudal del filtrado total del sistema es de 26.9 m³/h. Estos datos se pueden observar en la figura 5.5. (ver pp. 125 y 126)
- Se obtuvo que la inversión total para la implementación del sistema de filtrado de lodos es de S/ 540,768.75. (pp. 129)
En base al ahorro de agua que se generaría al implementar este sistema de filtrado (4515.8 m³/mes), se determinó que 16 meses posterior a la implementación del sistema de filtrado de lodos, la empresa Papelera Reyes S.A.C habrá cubierto la inversión inicial (S/ 540,768.75) y de ahí en adelante, la empresa ahorrará en sus gastos energéticos el monto de S/ 35,403.87 cada mes. (ver pp. 130 y 131)

VIII. RECOMENDACIONES

- Para diseñar un sistema de filtrado de lodos que optimice la reutilización del agua en la producción de papel Tisú, se recomienda conocer con certeza los procesos de producción del papel Tisú, pues estos van a determinar de donde proviene el lodo residual y también determinará en que procesos de producción se puede utilizar agua procedente del filtrado de lodos. Por otro lado, se recomienda conocer los procesos que ocurren en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, así como también la capacidad de la misma, pues al implementar un sistema de filtrado de lodos, el caudal de agua que ingresa a la PTAR aumenta y esta debe estar diseñada para poder procesar dicho caudal.
- Para determinar las propiedades físico-químicas del lodo a través de ensayos estandarizados, se recomienda tomar varias muestras de lodo y analizar las muestras con prioridad, debido a que con el pasar del tiempo, la muestra de lodo va cambiando de propiedades y no se obtienen datos reales. Así mismo, para determinar el caudal de lodo, se recomienda utilizar una data confiable y de un tiempo prolongado, por ejemplo se puede tomar la generación de lodo durante un año. De esta forma se dimensiona de forma correcta el sistema de filtrado de lodos y no se tendrá problemas de diseño por falta de capacidad del sistema.
- Para el dimensionamiento y selección de los componentes se recomienda tener en cuenta la procedencia de la maquinaria que se utiliza actualmente en la empresa Papelera Reyes S.A.C, con esto optimizamos la mantenibilidad de los equipos en planta. Por ejemplo, si se requiere seleccionar una bomba centrífuga para el sistema de filtrado, y se conoce que las bombas instaladas en Papelera Reyes son de la marca Hidrostaal, entonces se deberá seleccionar una bomba de la misma marca.

- Para simular el transporte de lodo con el software Pipe Flow Expert V7.50 se recomienda ingresar los datos de la bomba seleccionada de forma manual, debido a que en muchas ocasiones el banco de bomba centrífugas de este software no es completo. Por ello en la presente tesis se complementó la simulación utilizando como soporte la plataforma Pump-Flo.
- En la determinación de la viabilidad económica de la implementación del proyecto, se recomienda considerar el consumo energético de las máquinas, así como también, una posible ganancia en la gestión de lodo deshidratado, pues cada vez hay más empresas que compran este lodo seco para fines como fertilizantes orgánicos, fabricación de ladrillos, acondicionamiento de suelos y generación de biogás.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMADOR, Anisley, VELIZ Eliet y BATALLER Mayra. 2020. Tratamiento de lodos, generalidades y aplicaciones. *Revista Cenic Ciencias Químicas* [en línea]. Noviembre. 13-20 [fecha de consulta: 30 de junio de 2024]. ISSN 1015-8553. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181642434003.pdf>.

AMERICAN Society of Mechanical Engineers (ASME). 2022. *Process Piping ASME Code for Pressure Piping, 831* [en línea]. Nueva York: Policies [fecha de consulta: 20 de marzo de 2024], Disponible en: <http://go.asme.org/831committee>.

ANDRITZ Group. 2023. *Prensas de banda para tratamiento de lodos*. Power Press [en línea]. Abril. [fecha de consulta: 15 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://grzg.andritz.com/c/com2011/00/03/90/39042/1/1/0/-636029422/se-powerpress-prensas-de-banda-tratamiento-lodos-es.pdf>.

ANDRITZ Group. 2023. *Prensas de banda para tratamiento de lodos*. Power Drum [en línea]. Mayo. [fecha de consulta: 10 de diciembre de 2023]. Disponible en: <https://grzg.andritz.com/c/com2011/00/04/16/41677/1/1/0/22254849/se-powerdrum-es.pdf>

AQUA Development Network S.A. 2020. *¿Cómo dimensiono la línea de fangos de mi depuradora?* [en línea]. Madrid: Unión Editorial. [fecha de consulta: 21 de julio de 2024]. ISBN 9800987299. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/62790126/Diseno-Linea-de-Lodos-PTAR-1>

ARIAS, Fidas G. 2012. *El proyecto de investigación, Introducción a la metodología científica* [en línea]. Caracas: Editorial Episteme C.A [fecha de consulta: 12 de marzo de 2024]. ISBN 9800785299. Disponible en:

<https://abacoenred.org/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigación-F.G.-Arias-2012-pdf-1.pdf>.

CAPTERRA. 2024. Plataformas de bombas centrífugas. Capterra [en línea]. Marzo. [fecha de consulta: 11 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.capterra.pe/software/1021726/pump-flo>.

CARCASI CANAZAS, Jimmy Roy. 2022. *Propuesta de aprovechamiento de lodos residuales de una planta de tratamiento de agua como agregado fino para la producción de concreto en la provincia de Mala, Cañete*. Tesis [Título de Ingeniero Civil]. Lima: Universidad Ricardo Palma. [fecha de consulta: 30 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/5896>.

CASTILLO V. 2013. *Estudio teórico experimental de la agitación* [en línea]. Concepción: Editorial Planeta Chile. [fecha de consulta: 10 de julio de 2024]. ISBN 0195787299. Disponible en: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf.

CENGEL Y. 2010. *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones* [en línea]. México D.F: McGraw-Hill. [fecha de consulta: 21 de julio de 2024]. ISBN 9701056124. Disponible en: <https://archive.org/details/mecanicadefluidosfundamentoyunusa.cengel/page/n9/mode/2up>

CISNEROS Olga y SAUCEDO Heber. 2016. Reúso de aguas residuales en la agricultura [en línea]. México D.F: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. [fecha de consulta: 21 de junio de 2024]. ISBN 9786079368760. Disponible en: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/riego-drenaje/reuso-aguas-residuales.pdf.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2015. *Diseño de plantas de tratamiento de aguas residuales: Tratamiento y disposición de lodos* [en línea]. México D.F: SEMARNAT. [fecha de consulta: 20 de julio de 2024]. ISBN 9684145613. Disponible en: <https://files.conagua.gob.mx/conagua/mapas/SGAPDS-1-15-Libro4.pdf>.

CORNEJO ZEA, Alberto. 2021. *Propuesta de reaprovechamiento de lodos de filtración: caso planta de tratamiento de agua potable de filtros rápidos de Majes*. Tesis [Título en Ingeniería Mecánica]. Lima: Universidad Ricardo Palma. [fecha de consulta: 10 de abril, 2024]. Disponible en: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/4458>.

CUCHO, Juan. 2019. Reutilización del agua mediante el sistema de deshidratación de lodos (MacTube) en el proyecto Hilarión. *Proexplo2019* [en línea]. Diciembre. 47-54 [fecha de consulta: 20 de abril, 2024]. ISSN 0375-7765. Disponible en: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-122-267.pdf>.

DE LA OSSA VERGARA, Orlando José. 2022. *Evaluación de alternativas para el aprovechamiento de lodos de destintado generados en una empresa de producción de papel tisú*. Tesis [Máster en Ingeniería Industrial]. Castellón: Universidad de Jaume. [fecha de consulta: 21 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://repositori.uji.es/xmlui/handle/10234/200437>.

FLUIDMIX. 2024. *Agitador industrial serie HPS*. Effective Mixing [en línea]. Enero. [fecha de consulta: 08 de marzo de 2024]. Disponible en: <https://www.agitadoresfluidmix.com/agitador-industrial-hps/>.

GARNICA DAZA, Catalina. 2013. *Alternativa de gestión de lodos papeleros en la industria de papel Tisú y Kraft*. Tesis [Título en Ingeniería Industrial]. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana. [fecha de consulta: 21 de mayo de 2024]. Disponible en:

<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/12462/GarnicaDazaCatalina2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

GRUNDFOS S.A. 2021. *Manual de bombeo de aguas residuales* [en línea]. Bjerringbro: Innovate. [fecha de consulta: 20 de julio de 2024]. ISBN 2684145543. Disponible en: <https://www.grundfos.com/es/learn/research-and-insights/get-the-wastewater-engineering-manual-2-for-large-pumping-stations>

HERNÁNDEZ Sampieri, Roberto. 2014. *Metodología de la investigación* [en línea]. Juárez: McGraw-Hill. [fecha de consulta: 12 de marzo de 2024]. ISBN 9684229313. Disponible en: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2>. Hernández, Fernández y Baptista-*Metodología Investigación Científica 6ta ed.pdf*.

HIDROSTAL. 2024. *Catálogo bomba centrífuga ISO 2858*. Productos [en línea]. Abril. [fecha de consulta: 14 de abril de 2024]. Disponible en http://www.hidrostal.com.pe/pag%20bombas/L1/bomba_centri_iso_2858.html.

LEYVA COJAL, Wilson. 2017. *Implementación de un equipo deshidratador de lodos para reducir costos en la planta de tratamiento de aguas residuales domésticas, Minera Coimolache S.A 2017*. Tesis [Título profesional en Ingeniería Industrial]. Cajamarca: Universidad Privada del Norte. [fecha de consulta: 21 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/13001/Leyva%20Cojal%20%20Wilson.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

MARIN, L. y VILLANUEVA, A. 2023. Deshidratación de lodo residual a escala piloto en un secador convectivo rotacional, Caso: Planta de tratamiento de aguas santa clara, provincia de Lima, Perú. *Tecnia* [en línea]. Setiembre. 34-54 [fecha de consulta: 09 de mayo de 2024]. ISSN 0375-7765. Disponible

en: <http://www.scielo.org.pe/pdf/tecnica/v33n1/2309-0413-tecnica-33-01-21.pdf>.

MEJÍA Elías. 2005. *Técnicas e Instrumentos de Investigación* [en línea]. Lima: Centro de Producción Editorial e Imprenta de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. [fecha de consulta: 15 de marzo de 2024]. ISBN 99728340805. Disponible en: <http://online.aliat.edu.mx/adistancia/InvCuantitativa/LecturasU6/tecnicas.pdf>

METCALF L. y EDDY H. 2010. *Ingeniería de aguas residuales* [en línea]. Madrid: McGraw-Hill. [fecha de consulta: 20 de julio de 2024]. ISBN 0070416907. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/510432984/Ingenieria-de-Aguas-Residuales-Volumen-2-3ra-Edicion-METCALF-EDDY-FREELIBROS-me>.

MINISTERIO del Medio Ambiente. 2013. Lodos de depuradora. *Ministerio de fomento* [en línea]. Diciembre. 4-12 [fecha de consulta: 30 de junio de 2024]. ISSN 1323-7233. Disponible en: https://www.cedexmateriales.es/upload/docs/es_LODOSDEDEPURADORADIC2013.pdf.

MINISTERIO de Vivienda. 2017. Condiciones mínimas de manejo de lodos. *El Peruano* [en línea]. Abril. 2-8 [fecha de consulta: 20 de marzo de 2024]. ISSN 1653-7233. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1506028-3>.

NICOMEDES, Esteban. 2018. Tipos de investigación. *Universidad Santo Domingo de Guzmán* [en línea]. Julio. 14-24 [fecha de consulta: 19 de abril de 2024]. ISSN 0123-7233. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/250080756.pdf>.

NIÑO, V. 2011. *Metodología de la Investigación* [en línea]. Bogotá: Ediciones de la U. [fecha de consulta: 31 de marzo de 2024]. ISBN 9789588675947. Disponible en: https://gc.scalahed.com/recursos/files/r161r/w24802w/Nino-Rojas-Victor-Miguel_Metodologia-de-la-Investigacion_Diseño-yejecucion_2011.pdf.

ONU. 2012. Huella hídrica del papel. *Two Sides* [en línea]. Enero. 24-54 [fecha de consulta: 02 de junio de 2024]. ISSN 0345-1243. Disponible en: https://al.twosides.info/wp-content/uploads/sites/8/2020/08/Fact-Sheet_4_HUELLA-H%C3%8DDRICA-.pdf.

PAPELERA REYES S.A.C. 2019. Informe técnico sustentatorio. *Ministerio Público* [en línea]. Diciembre. 24-54 [fecha de consulta: 11 de junio de 2024]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/669080/rd_165-2020-dgaami.pdf.

PAPELERA REYES S.A.C. 2024. Informe técnico sustentatorio. *Ministerio Público* [en línea]. Febrero. 21-52 [fecha de consulta: 11 de junio de 2024]. Disponible en: https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/308491/Resolución_Director al_N__0316-2019-PRODUCEDGAAMI20190416-30401-1cbihue.pdf.

PINZÓN OSORIO, Luisa Fernanda. 2022. *Diseño de una planta de deshidratación y secado de lodos industriales provenientes del proceso de enfriamiento de un horno incinerador de la empresa Prosarc S.A.* Tesis [Título de Ingeniero Químico]. Bogotá: Universidad de América. [fecha de consulta: 25 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8840/1/6162985-2022-1-IQ.pdf>.

PIPE FLOW Expert. 2024. *Software de caudal en tuberías: calculadoras de caudal del sistema y caída de presión en tuberías*. Software Solutions [en línea]. Abril. [fecha de consulta: 11 de junio de 2024]. Disponible en: <https://www.pipeflow.com/pipe-flow-expert-software>.

RIOS JOAQUÍN, Crystel Claudia. 2021. *Uso de los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales como aditivo para concreto*. Tesis [Título de Ingeniero Ambiental]. Huacho: Universidad Nacional José Faustino Carrión. [fecha de consulta: 30 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repositorio.unjfsc.edu.pe/handle/20.500.14067/4538>.

RODRIGEZ TORRES, José Nicolas. 2013. *Propuesta metodológica para tratamiento de lodos provenientes de plantas de potabilización en la sabana de Bogotá (Estudio de caso Madrid, Cundinamarca)*. Tesis [Título de Ingeniero Ambiental]. Bogotá: Universidad Libre. [fecha de consulta: 08 de junio de 2024]. Disponible en: <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11289>.

ROMERO ORDOÑEZ, Daniela. 2021. *Estandarización de la planta de tratamiento de lodos generados por la planta potabilizadora de Tixán*. Tesis [Título de Ingeniero Químico]. Cuenca: Universidad de Cuenca. [fecha de consulta: 15 de junio de 2024]. Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/36141>.

SAVINO Barbera. 2024. *Catálogo de agitadores industriales para uso intensivo*. Productos [en línea]. Junio. [fecha de consulta: 02 de junio de 2024]. Disponible en: <https://savinobarbera.com/productos/agitadores-industriales-resistentes-a-la-corrosion/agitadores-verticales-al/?lang=es>.

WIDE TEC Laboratory C.A. 2019. *Polímeros de alto peso molecular*. Equipos y materiales [en línea]. Marzo. [fecha de consulta: 13 de mayo de 2024].

Disponible en: <https://www.widetec.com.ve/polimeros-de-alto-peso-molecular/>.

WILL Pump. 2024. *Catálogo de bombas Wilden de doble diafragma*. Productos [en línea]. Enero. [fecha de consulta: 15 de mayo de 2024]. Disponible en: <https://www.willpump.com.mx/wilden>.

X. ANEXOS

Anexo N° 1: Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	MÉTODO y TÉCNICA
<p>PROBLEMA GENERAL:</p> <p>¿Cómo optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL:</p> <p>Diseñar un sistema de filtrado de lodo para optimizar la reutilización del agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C.</p>	<p>HIPOTESIS GENERAL:</p> <p>El diseño de un sistema de filtrado de lodo en base a manuales técnicos, procedimientos estandarizados y software de ingeniería optimiza la reutilización del agua en la producción de papel Tisú de Papelera Reyes S.A.C.</p>	<p>VARIABLE I</p> <p>Diseño de un sistema de filtrado de lodos</p> <p>DIMENSIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Características y cantidad del lodo • Dimensionamiento, y selección. • Simulación. <p>VARIABLE II</p> <p>Reutilización del agua</p> <p>DIMENSIONES</p> <ul style="list-style-type: none"> • Caudal de agua clarificada 	<p>TIPO DE INVESTIGACIÓN:</p> <p>Aplicada</p> <p>DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:</p> <p>No experimental</p> <p>ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN:</p> <p>Cuantitativo</p> <p>POBLACION Y MUESTRA:</p> <p>El diseño de investigación presentado es documental, por ende no se determina población y muestra.</p> <p>TÉCNICAS A EMPLEAR:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Observación. • Revisión de documentos • Entrevistas <p>INSTRUMENTOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Guías de selección de fabricantes. • Manuales de equipos. • Software Pipe Flow Exoert V7.40. • Informes económicos
<p>PROBLEMAS ESPECIFICOS:</p> <p>P.1: ¿Cómo caracterizar y cuantificar el lodo generado en la producción de papel Tisú?</p> <p>P.2: ¿Cómo dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de filtrado de lodo?</p> <p>P.3: ¿Cómo simular el transporte de lodo a través del sistema de filtrado?</p>	<p>OBJETIVOS ESPECIFICOS:</p> <p>O.1: Caracterizar y cuantificar el lodo generado en la producción de papel Tisú.</p> <p>O.2: Dimensionar y seleccionar los componentes del sistema de filtrado de lodo.</p> <p>O.3: Simular el transporte de lodo a través del sistema de filtrado.</p>	<p>HIPOTESIS ESPECIFICAS:</p> <p>H1: Utilizando ensayos estandarizados y datos logísticos, se caracteriza y cuantifica el lodo generado en la producción de papel Tisú.</p> <p>H2: La elaboración de cálculos de diseño y selección en base a manuales técnicos, permite el dimensionamiento y selección de los componentes del sistema de filtrado de lodo.</p> <p>H3: El cálculo hidráulico con el software Pipe Flow Expert simula el transporte de lodo a través del sistema de filtrado.</p>		

Anexo N° 2: Autorización de la empresa Papelera Reyes S.A.C



Yo... Josmell Llacza Lizarraga identificado con DNI 45471146, en mi calidad de Jefe de Proyectos del área de Proyectos de la empresa Papelera Reyes S.A.C. con R.U.C N° 20506392234, ubicada en la ciudad de Callao, Provincia Constitucional del Callao, Perú.

OTORGAMIENTO LA AUTORIZACIÓN

A los señores:

Christian Andre Zavala Rivera identificado con DNI N° 47133575, bachiller de la escuela profesional de ingeniería mecánica, para que utilicen la siguiente información de la empresa:

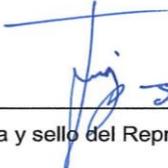
- ✓ Planos P&ID, de arquitectura, planos mecánicos y de tubería de la empresa Papelera Reyes S.A.C.
- ✓ Expediente técnico y manuales de las máquinas del proyecto Prensa de Lodos y PTARI.
- ✓ Memoria descriptiva de la línea de producción en la MP1.
- ✓ Reporte de balance de efluentes.
- ✓ Informe técnico sustentatorio (2019-2023) y Declaración de impacto ambiental (2021-2023).

con la finalidad de que pueda desarrollar su (X) Tesis o () Trabajo de suficiencia profesional para optar el Título Profesional.

Indicar si el Representante que autoriza la información de la empresa, solicita mantener el nombre o cualquier distintivo de la empresa en reserva, marcando con una "X" la opción seleccionada.

() Mantener en Reserva el nombre o cualquier distintivo de la empresa; o

(X) Mencionar el nombre de la empresa.


Firma y sello del Representante Legal
DNI: 45471146

El Bachiller declara que los datos emitidos en esta carta y en el Trabajo de Investigación, en la Tesis son auténticos. En caso de comprobarse la falsedad de datos, el bachiller será sometido al inicio del procedimiento disciplinario correspondiente; asimismo, asumirá toda la responsabilidad ante posibles acciones legales que la empresa, otorgante de información, pueda ejecutar.

Firma del Bachiller

DNI:

Adjunta copia del DNI del Representante Legal o Representante del área

Anexo N° 4: Informe de muestra de lodos en Papelera Reyes S.A.C.



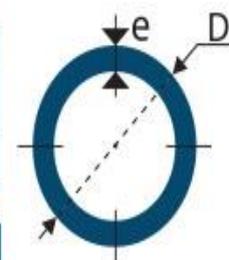
Proyecto: Planta de lodos



PROVEEDOR HIDROLAB S.A.C	NOMBRE DEL ACUERDO Muestra de lodos					FECHA DEL INFORME 26/10/2023	
TURNO: Dia	N° DEL INFORME 25	ÁREA Av. Nestor Gambetta 6693, Callao 07046					
NOMBRE	HORA INICIO	HORA FIN	HH D. CONST.	HH D. PRECOM	HH IND. (INTERNA)	HH REFRIG	HORAS TOTALES
Diego Alonso Saldaña	08:30	17:00				1	8
Jairo Mamani	08:30	17:00				1	8
HORAS TOTALES A LA FECHA (INCLUYENDO HOY):							
DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO PREVIO REALIZADO:							
<ol style="list-style-type: none"> El día 10 de Julio de 2023 se tuvo la presencia del equipo de Hidrolab S.A.C a las 8:30 am, retirándose el mismo día a las 12:15 pm. El motivo de su visita fue tomar muestras del lodo proveniente del tanque colector del lodo. Se llevaron cuatro muestras de lodo en tiempos de intercalado de 30 minutos. El día 28 de Julio de 2023 la empresa Hidrolab S.A.C envió vía correo electrónico el informe de laboratorio de estas muestras. A continuación se presenta la data obtenida. 							
PARÁMETRO		NUMERO DE MUESTRA				PROMEDIO	
HUMEDAD (% en masa)	98.54	98.64	99.03	97.79	98.5		
DENSIDAD (kg/m ³)	1010	1025	1015	1030	1020		
SOLIDOS TOTALES (%m)	1.42	1.62	1.51	1.48	1.50		
DQO (mg/L)	5320	5159	5485	5233	5321		
CONCENTRACIÓN EN VOLUMEN, C _v (%)	4.8	5.5	4.6	5.1	5.0		
TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS d ₅₀ (µm)	225	209	227	207	217		
VISCOSIDAD (Kg/m. s)	0.0025	0.0005	0.0015	0.001	0.0017		
COMENTARIOS DEL PROVEEDOR: Los métodos utilizados fueron los siguiente:							
<ul style="list-style-type: none"> DQO 5220 D. Método Reflujo Calorimétrico cerrado SST 2540 D. Secados entre 103°C – 105°C Turbidez 2130 B. Método Nefelométrico Grasas y Aceites 5520 D. Método de Extracción Soxhlet 							
NOMBRE/FIRMA REPRESENTANTE DEL PROVEEDOR: Diego Saldaña	CARGO  Ingeniero de Campo			FECHA 23/10/2023			

Anexo N° 5: Dimensiones ANSI para tuberías de acero inoxidable

Composición Química %				Propiedades Mecánica				
C. Max	Mn	P. Max	S. Max	Resistencia Mecánica		Punto de Fluencia		Elongación %
				Kg/mm2	Psi	Kg/mm2	Psi	Min
0.3	1.2	0.05	0.06	42.2	60000	24.6	35000	30 - 35



DIÁMETRO			PROPIEDADES				
INTERIOR	EXTERIOR (D)		ESPESOR (e)		PRESIÓN/PRUEBA		PESO
pulg	mm	pulg	mm	pulg	kg/cm ²	lb/pulg ²	kg/mts
1/2"	21.30	0.84	2.77	0.10	49	700	1.27
3/4"	26.70	1.05	2.87	0.11	49	700	1.68
1"	33.40	1.31	3.38	0.13	49	700	2.50
1 1/4"	42.20	1.66	3.56	0.14	91	1300	3.38
1 1/2"	48.30	1.90	3.68	0.14	91	1300	4.05
2"	60.30	2.37	3.91	0.15	176	2500	5.44
2 1/2"	73.00	2.87	5.16	0.20	176	2500	8.62
3"	88.90	3.50	5.49	0.21	176	2500	11.29
4"	114.30	4.50	6.02	0.23	155	2210	16.07
5"	141.30	5.56	6.55	0.25	137	1950	21.78
6"	168.30	6.62	7.11	0.28	125	1780	28.26
8"	219.10	8.62	8.18	0.32	110	1570	42.53
10"	273.00	10.75	9.27	0.36	101	1430	60.29
12"	323.80	12.75	10.31	0.40	94	1340	79.65

Anexo N° 6: Valores de aspereza de superficie para diversos materiales

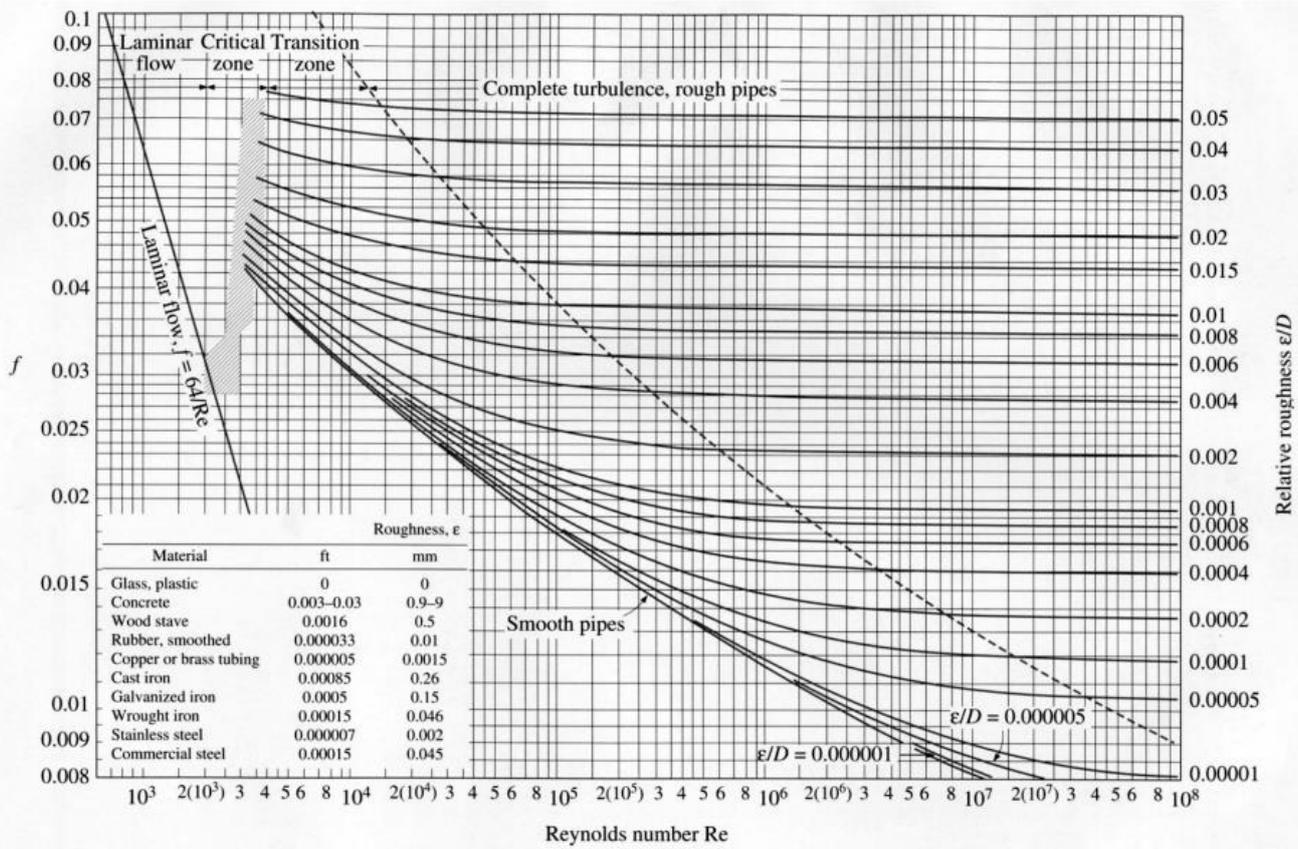
TABLA 5-6 Valores de aspereza superficial para varios materiales*

Material	Aspereza de superficie ϵ , mm
Tubos estirados (latón, plomo, vidrio y similares)	0.00152
Acero comercial o hierro	0.0457
Hierro fundido asfaltado	0.122
Hierro galvanizado	0.152
Hierro fundido	0.259
Duelas de madera	0.183–0.914
Concreto	0.305–3.05
Acero remachado	0.914–9.14

*Moody, *Trans. Am. Soc. Mech. Eng.* **66**, 671-684 (1944); *Mech. Eng.* **69**, 1005-1006 (1947). King y Brater, *Handbook of Hydraulics*, 6a. ed. pp. 6-12 y 6-13, McGraw-Hill, New York, 1976, presentan valores adicionales ϵ para varios tipos o condiciones, de concreto, hierro forjado, acero soldado, acero remachado y tuberías de metal corrugado. Para convertir milímetros a ft, multiplicar por 3.281×10^{-3} .

Anexo N° 7: Diagrama de Moody.

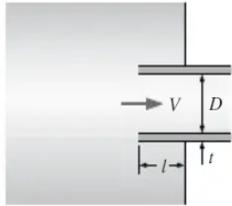
Diagrama de Moody



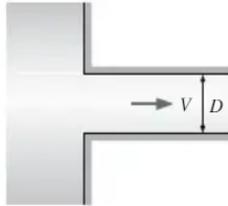
Anexo N° 8: Coeficiente de pérdida K en ingreso y salida de tuberías.

Coeficientes de pérdida K_L de varios accesorios de tubería para flujo turbulento (para usar en la relación $h_L = K_L V^2 / (2g)$, donde V es la velocidad promedio en la tubería que contiene el accesorio)*

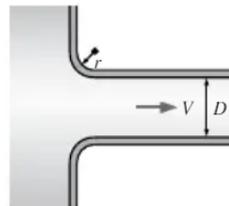
Entrada de la tubería
 Reentrante: $K_L = 0.80$
 ($t \ll D$ e $l \approx 0.1D$)



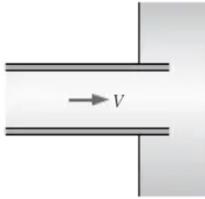
De borde agudo: $K_L = 0.50$



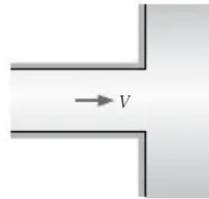
Redondeada ($r/D > 0.2$): $K_L = 0.03$
 Ligeramente redondeada ($r/D = 0.1$): $K_L = 0.12$
 (véase figura 8-40)



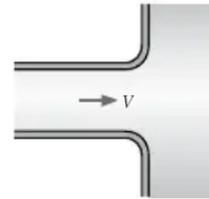
Salida de la tubería
 Reentrante: $K_L = \alpha$



De borde agudo: $K_L = \alpha$



Redondeada: $K_L = \alpha$



Nota: el factor de corrección de energía cinética es $\alpha = 2$ para flujo laminar totalmente desarrollado, y $\alpha \approx 1.05$ para flujo turbulento totalmente desarrollado.

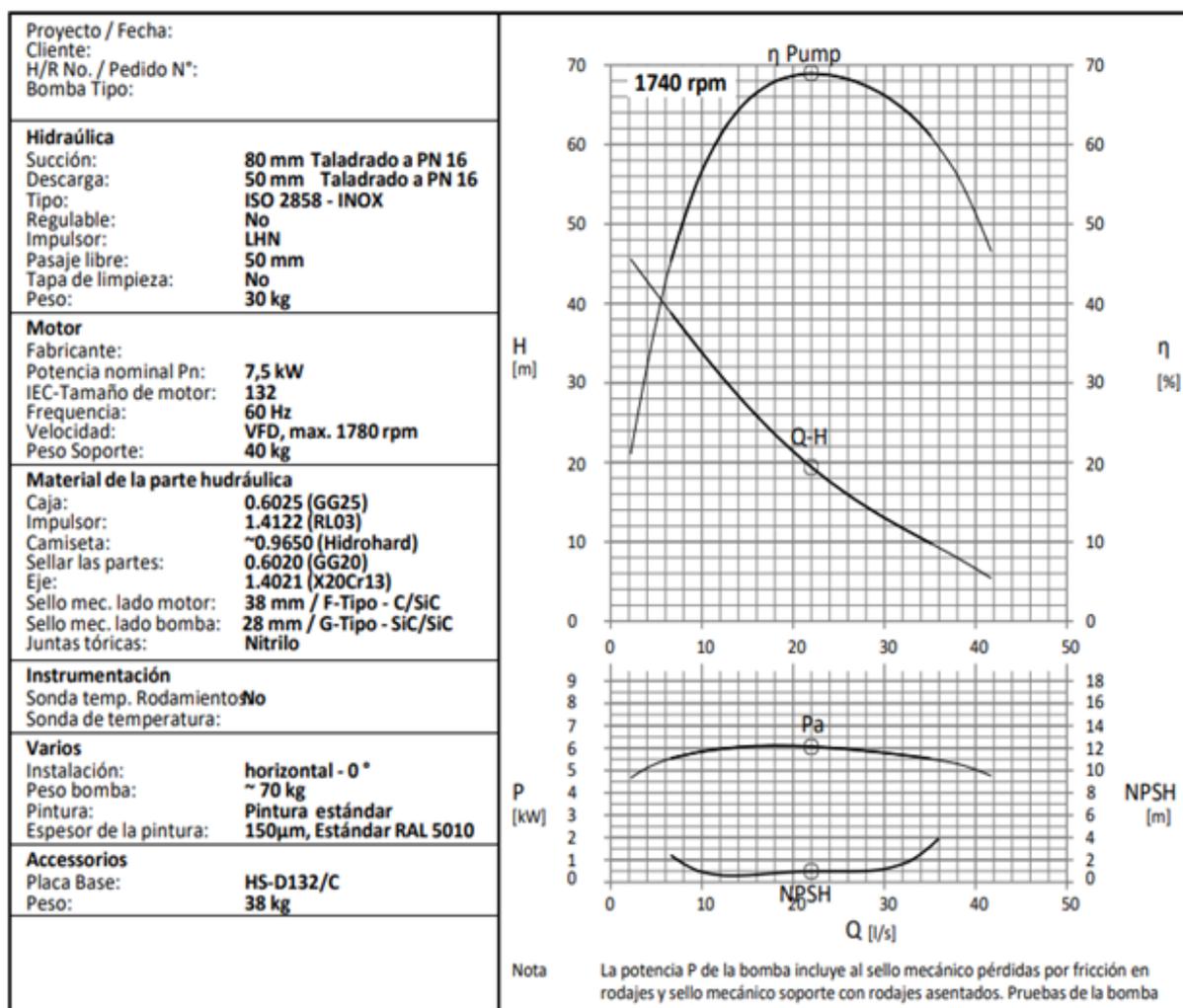
Anexo N° 9: Coeficiente de pérdida K en accesorios o válvulas.

Tipo de accesorio o válvula	Pérdida adicional por fricción, No. equivalentes de cargas de velocidad,
L de 45°, estándar ^{b,c,d,e,f}	0.35
L de 45°, radio largo ^c	0.2
L de 90°, estándar ^{b,c,e,f,g,h}	0.75
Radio largo ^{b,c,d,e}	0.45
Cuadrada o a inglete ^h	1.3
Codo de 180°, retorno cerrado ^{b,c,e}	1.5
T estándar en un tramo, bifurcación sellada ^e	0.4
Usada como L al entrar a una bifurcación ^{g,i}	1.0
Usada en L al entrar a una bifurcación ^{c,g,i}	1.0
Flujo que se bifurca ^{i,j,k}	1 ⁱ
Acoplamiento ^{c,e}	0.04
Unión ^e	0.04
Válvula de compuerta ^{b,c,m} abierta	0.17
3/4 abierta ⁿ	0.9
1/2 abierta ⁿ	4.5
1/4 abierta ⁿ	24.0
Válvula de diafragma, ^o abierta	2.3
3/4 abierta ⁿ	2.6
1/2 abierta ⁿ	4.3
1/4 abierta ⁿ	21.0
Válvula de globo, ^{c,m} de asiento biselado, abierta	6.0
1/2 abierta ⁿ	9.5
De asiento compuesto, abierta	6.0
1/2 abierta ⁿ	8.5
De tapón, abierto	9.0
3/4 abierta ⁿ	13.0
1/2 abierta ⁿ	36.0
1/4 abierta ⁿ	112.0
Válvula angular, ^{b,c} abierta	2.0
Y o válvula de escape, ^{b,m} abierta	3.0
De llave ciega ^p (Fig. 5-42) $\theta = 5^\circ$	0.05
10°	0.29
20°	1.56
40°	17.3
60°	206.0
Válvula de mariposa ^p (Fig. 5-43) $\theta = 5^\circ$	0.24
10°	0.52
20°	1.54
40°	10.8
60°	118.0
Válvula de retención ^{b,c,m} de columpio	2.0 ^q
De disco	10.0 ^q
De bola	70.0 ^q
Válvula de pie ^e	15.0
Medidor de agua ^h , disco	7.0 ^r
De pistón	15.0 ^r
Rotatoria (disco en estrella)	10.0 ^r
De rueda de turbina	6.0 ^r

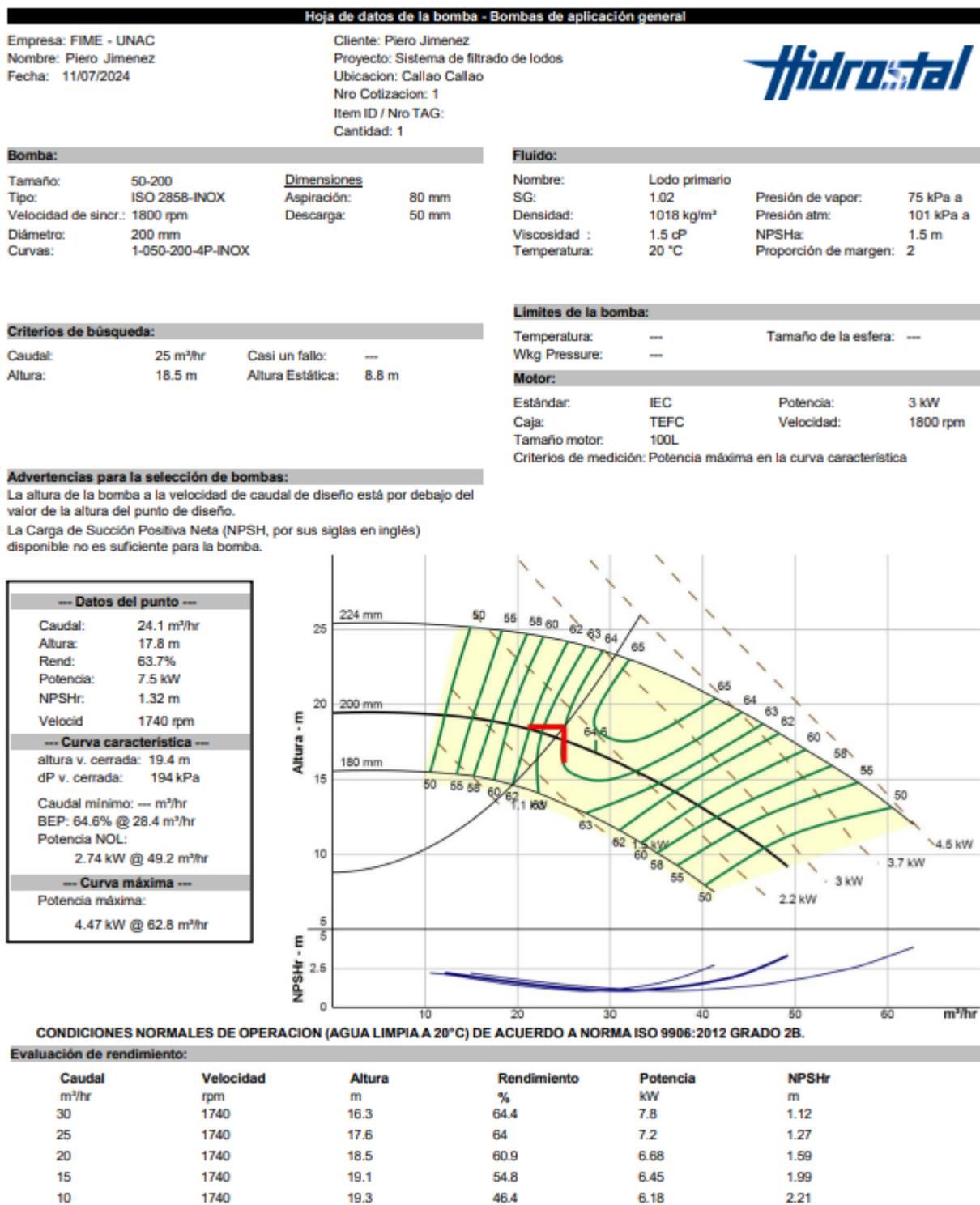
Anexo N° 10: Ficha de datos de la bomba Hidrostral ISO 2858-INOX.

		Datos bomba con soporte de rodamientos				S	POS.	1
1	Cliente :	PAPER SERVICES INTEGRATED S.L.						
2	Oferta N° :	C21-125-7 (REV1)						
3	Proyecto:	PSI						
4	Código cliente							
5	Cantidad :	2	Código de la bomba	HIDROSTAL ISO 2858 - INOX				
Descripción								
6	Grupo moto-BOMBA SUMERGIBLE para las condiciones de servicio indicadas anteriormente, con impulsor de tornillo helicoidal centrífugo patentado, inatascable, no cizalla, no emulsiona, con motor de alta eficiencia trifásico de 7.5 kW a 3600 rpm, 0 V / 60 / VFD Hz, y arranque 0. Aislamiento clase 0, con protección de temperatura 0, y 0m de cable eléctrico. Dispositivo de elevación HS-D132/C - Dismounting base plate DDM/DDS/IDDZ1X-132 - 38 kg							
Condiciones hidráulicas solicitadas								
7	Líquido			Min.	Nom.	Máx.		
8	Sólidos	%	Caudal nom			m ³ /h	NPSHa	
9	Paso libre requerido	mm	Caudal real			l/s	NPSHr	
10	Temperatura	°C	Altura nom			m.c.a	Rendimiento	
11	Densidad ρ_s	kg/m ³	Altura real			m	Profundidad del pozo	
12	Viscosidad ν_s	mm ² /s					Potencia nominal P_N	
13	Condición de aspiración						Velocidad bomba	
14							rpm	
Construcción								
15	Bridas	DN [mm]	PN [bar]	Posición		Tipo de hidráulica	D03U	
16	Brida de succión	80	16			Regulable	No	
17	Brida de descarga	50	16			Tipo de rodete	LHN	
18	Dispositivo de bajada en descar					Paso libre [mm]	50	
19						Instalación	50	
Motor								
20	Fabricante	HIDROSTAL		Protección del bobinado				
21	Tipo			Modo de arranque				
22	Potencia nominal P_N [kW]	7,5		Longitud del cable [m]				
23	Tensión [V]	0		Detalles del cable				
24	Frecuencia [Hz]	60 / VFD		EMV-Cable				
25	Velocidad [U/min °]	1740 RPM		Antidefragante				
26	Corriente nominal [A]			Clase de protección				
27	Intensidad de arranque I_s / I_N			Tipo de aislamiento				
28	Cos ϕ			Disco volante				
29				Cantidad de aceite [l]				
Material								
30	Caja	0.6025 (GG25)		Eje		1.4021 (X20Cr13)		
31	Rodete	1.4122 (RL03)		Cierre mecánico motor		38 mm / F-Tipo - C/SIC		
32	Camiseta de ajuste	-0.9650 (Hidroharc)		Cierre mecánico hidráulica		28 mm / G-Tipo - SIC/SIC		
33	Tapa trasera	0.6020 (GG20)		Juntas tóricas		Nitrile		
34								
Instrumentación								
35	Sonda de humedad	No		Sonda de temperatura				
36	Sonda de flotación			Relé sonda de humedad				
37	Sonda temperatura rodamientos	No		Relé termistor PTC				
38								
Test (Pruebas)								
				EN ISO9906:1999 Klasse 2 Anexo A				
39	Test requerido	No		Rendimiento completo [%]				
40	Test hidrostático [bares]			Rendimiento hidráulico[%]				
41	Test rendimiento Q/H [l/s m]			Motor				
42	NPSH [m]							
Documentación								
43	Manual	94-BA 5039E, 94-BA 5030E, 94-BA 5086E		Curva Q/H Rendimiento		C-2480-3491		
44				Dibujo de sección		S-5820, S-6371		
45	Esquema eléctrico			Protocolo de ensamble				
46	Dibujo dimensional	M-4802, M-8508, M-9057, M-9926		Certificados				

Anexo N° 11: Curva característica de la bomba Hidrostral ISO 2858



Anexo N° 12: Hoja de datos de bomba seleccionada en Pump-Flo.

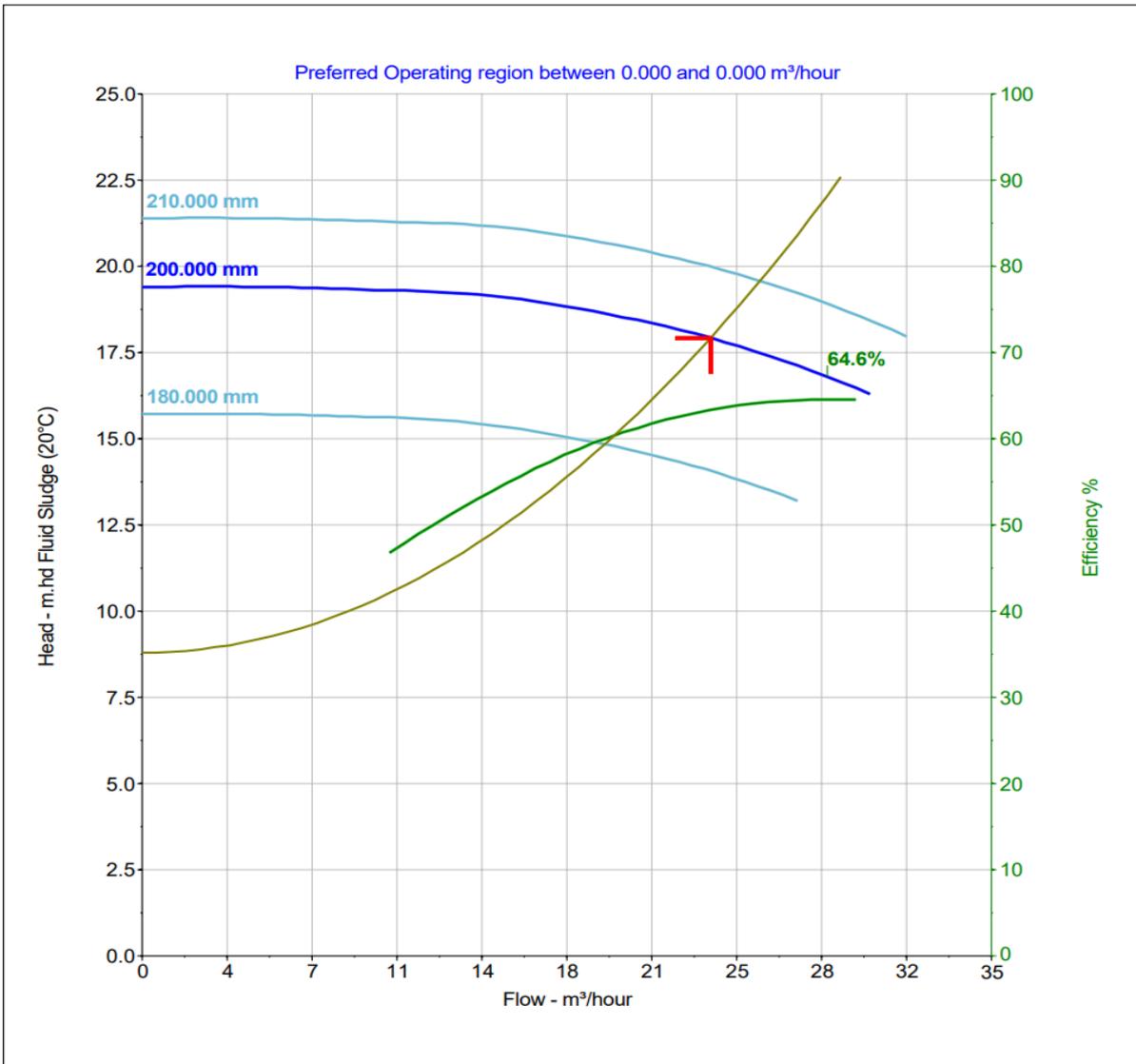


Anexo N° 13: Resultados en la simulación de Pipe Flow Expert V 7.40.

PUMP DATA SHEET generated using Pipe Flow Expert software



Pump Data	Fluid Data	Operating Notes
Name: BOMBA LODOS Catalog: Manufacturer: Hidrostal Type: ISO 2858-INOX Size: 80x50 - 200 Stages: 0 Speed: 1740 Rpm Impeller Diam: 200.000 mm Min Speed: 900 Rpm Max Speed: 1740 Rpm Min Diam: 180.000 mm Max Diam: 210.000 mm	Fluid: Sludge Density: 1020.000000 kg/m ³ Viscosity: 1.5000 cP Temperature: 20.000 °C Vapor Pressure: 75.000 kPa.a Atm Pressure: 101.325 kPa.a Design Curve Shutoff Head: 19.400 m.hd Fluid Shutoff dP: 194.054 kPa.g BEP: 64.6% @ 28.241 m ³ /hour Power at BEP: 7.04 kW NPSHr at BEP: 7.153 m.hd Fluid Max Flow Power: 7.11 kW @ 30.000 m ³ /hour	Operating Notes Pref. Op. Region: 0% - 0% of BEP Pref. Flow Range: 0.000 - 0.000 m ³ /hour Notes: Data Point Flow: 23.433 m ³ /hour Head: 17.925 m.hd Fluid Efficiency: 63.32% Power: 7.84 kW NPSHr: 1.884 m.hd Fluid



Anexo N° 14: Estructura tarifaria de agua potable (SEDAPAL)



SERVICIO DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO DE LIMA - SEDAPAL S.A.

ESTRUCTURA TARIFARIA

Por los Servicios de Agua Potable y Alcantarillado

1. CARGO FIJO (S/ / Mes) 6,256

2. CARGO POR VOLUMEN

CLASE CATEGORIA	RANGOS DE CONSUMOS m ³ /mes	TARIFA (S/ / m ³)			
		GRUPO TARIFARIO 1 ⁽¹⁾		GRUPO TARIFARIO 2 ⁽²⁾	
		Agua Potable	Alcantarillado ⁽³⁾	Agua Potable	Alcantarillado ⁽³⁾
RESIDENCIAL					
Social	0 a más	1,713	0,802	1,713	0,802
Doméstico No Beneficiario	0 a 20	2,015	1,257	2,862	1,760
	20 a más			7,314	3,486
	20 a 50	2,862	1,760		
	50 a más	7,314	3,486		
Doméstico Beneficiario	0 a 10	1,713	0,802	1,713	0,802
	10 a 20	1,911	0,932	1,911	0,932
	20 a 50	2,862	1,760	2,862	1,760
	50 a más	7,314	3,486	7,314	3,486
NO RESIDENCIAL					
Comercial y Otros	0 a 1000	7,314	3,486	7,314	3,486
	1000 a más	7,846	3,738	7,846	3,738
Industrial	0 a más	7,846	3,738	7,846	3,738
Estatat	0 a más	4,809	2,219	4,809	2,219

⁽¹⁾ El Grupo Tarifario 1 comprende a todos los distritos administrados por SEDAPAL S.A. con excepción de los distritos de Punta Negra, Punta Hermosa, San Bartolo y Santa María del Mar

⁽²⁾ El Grupo Tarifario 2 comprende a los distritos de Punta Negra, Punta Hermosa, San Bartolo y Santa María del Mar.

⁽³⁾ Incluye los servicios de recolección y tratamiento de aguas residuales.

Notas

A.- No incluye I.G.V.

B.- En aplicación a lo dispuesto en:

Artículos 71 y 73° del Decreto Legislativo N° 1280, que aprueba la Ley Marco de la Gestión y Prestación de los Servicios de Saneamiento, modificado por Decreto Legislativo N° 1620.

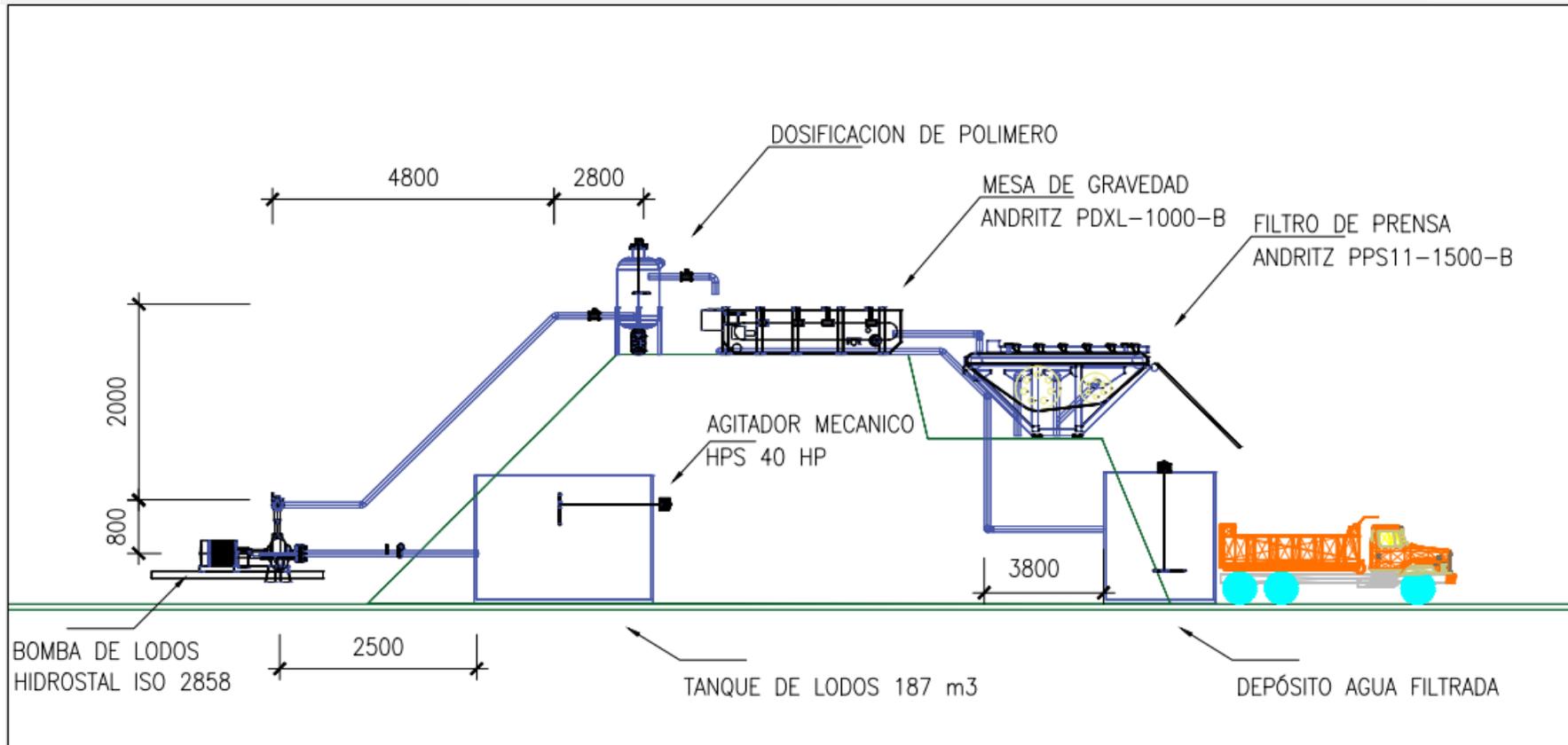
Anexo N° 03 de la Resolución de Consejo Directivo N° 079-2021-SUNASS-CD.

Capítulo I del Título III del Reglamento General de Tarifas de los Servicios de Saneamiento brindados por Empresas Prestadoras, aprobado mediante Resolución de Consejo Directivo N° 028-2021-SUNASS-CD.

C.- La presente Estructura Tarifaria se aplicará a partir del primer ciclo de facturación inmediatamente posterior al inicio del tercer año regulatorio.

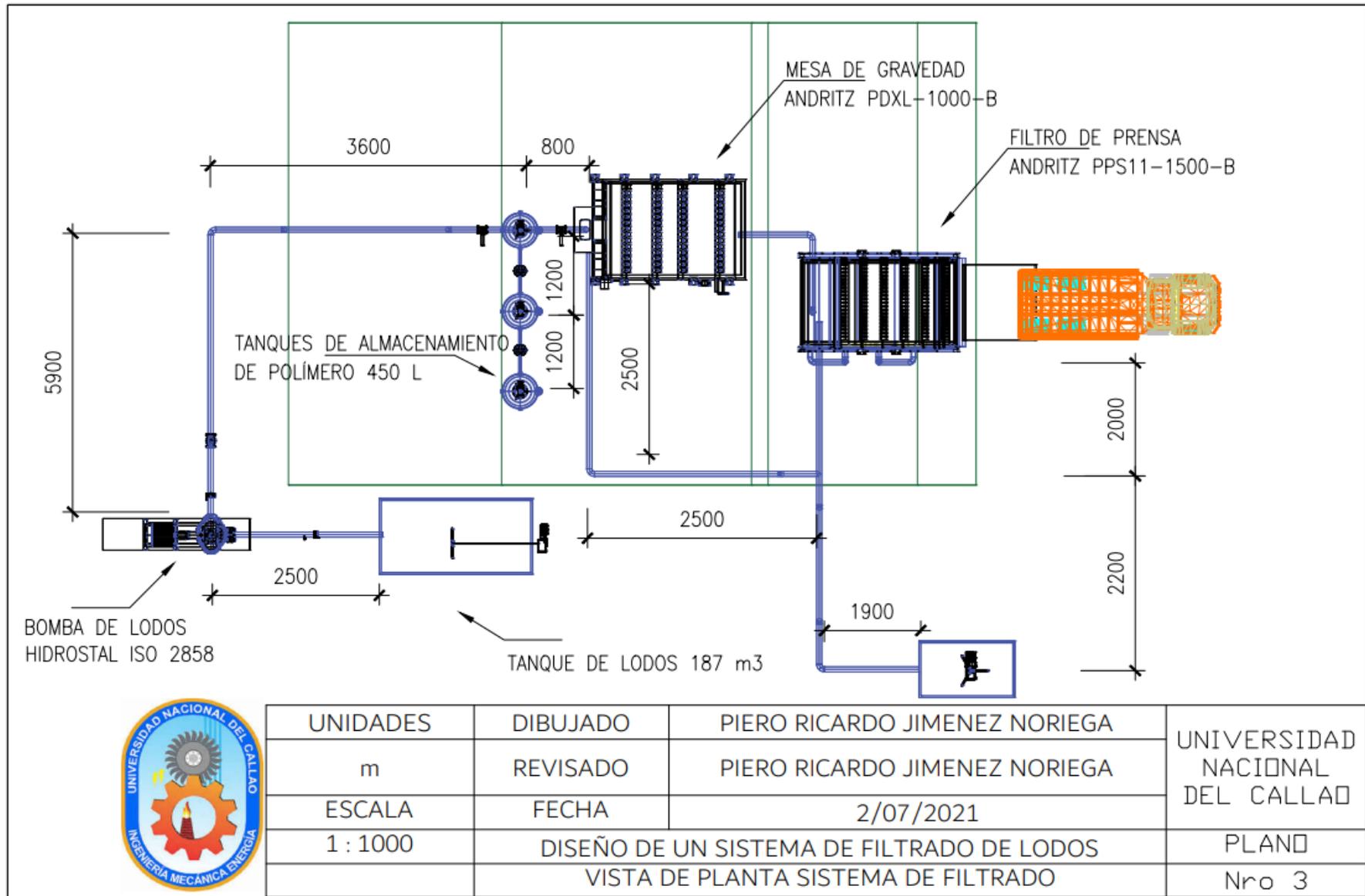
Publicado en el diario El Peruano 03.01.2024

Anexo N° 15: Vista frontal del sistema de filtrado de lodos.



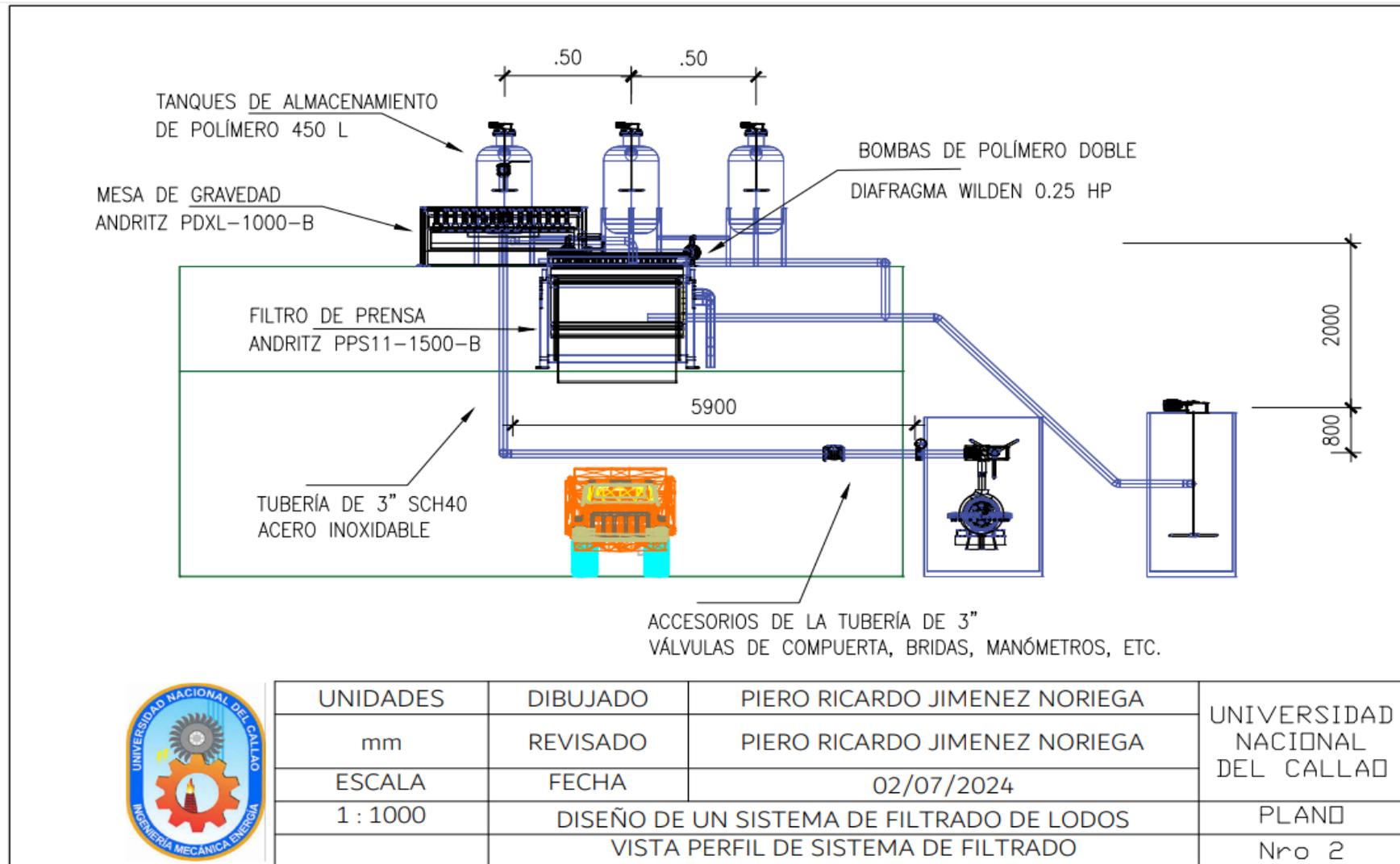
UNIDADES	DIBUJADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
mm	REVISADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	
ESCALA	FECHA	02/06/2024	PLANO Nro 1
1 : 1000	DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODOS VISTA FRONTAL DE SISTEMA DE FILTRADO		

Anexo N° 16: Vista de planta del sistema de filtrado de lodos.

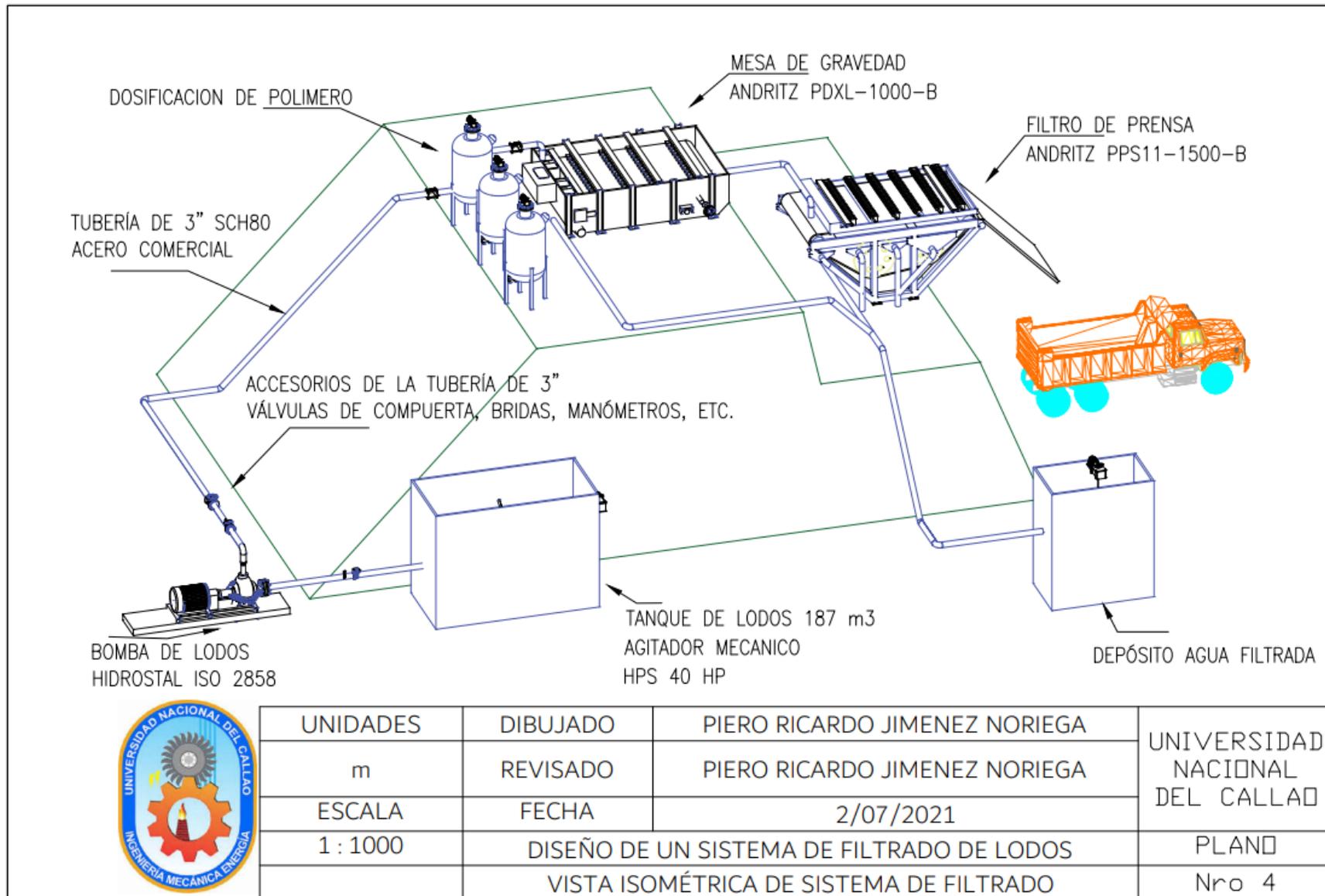


UNIDADES	DIBUJADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
m	REVISADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	
ESCALA	FECHA	2/07/2021	
1 : 1000	DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODOS VISTA DE PLANTA SISTEMA DE FILTRADO		PLANO Nro 3

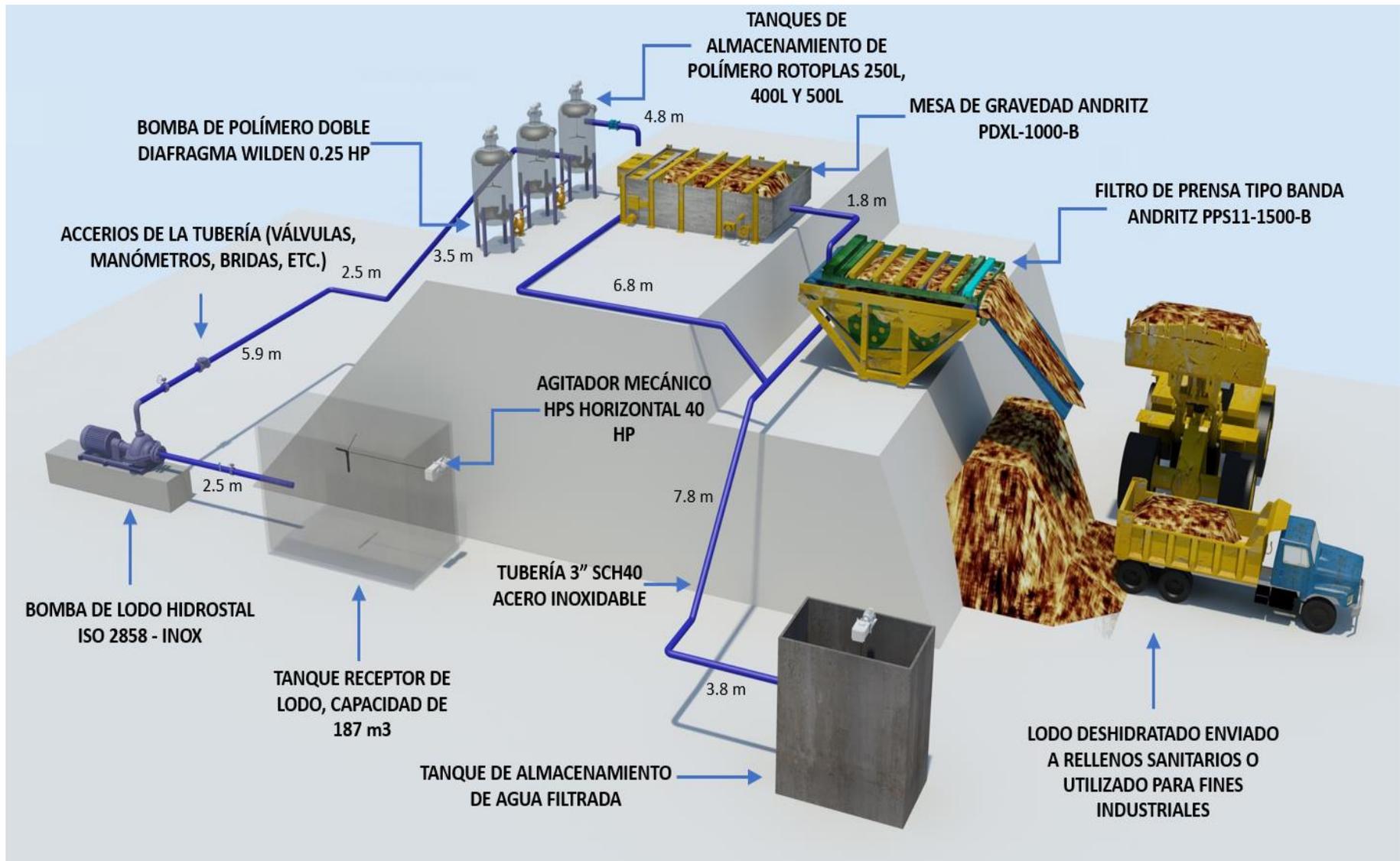
Anexo N° 17: Vista perfil del sistema de filtrado de lodos.



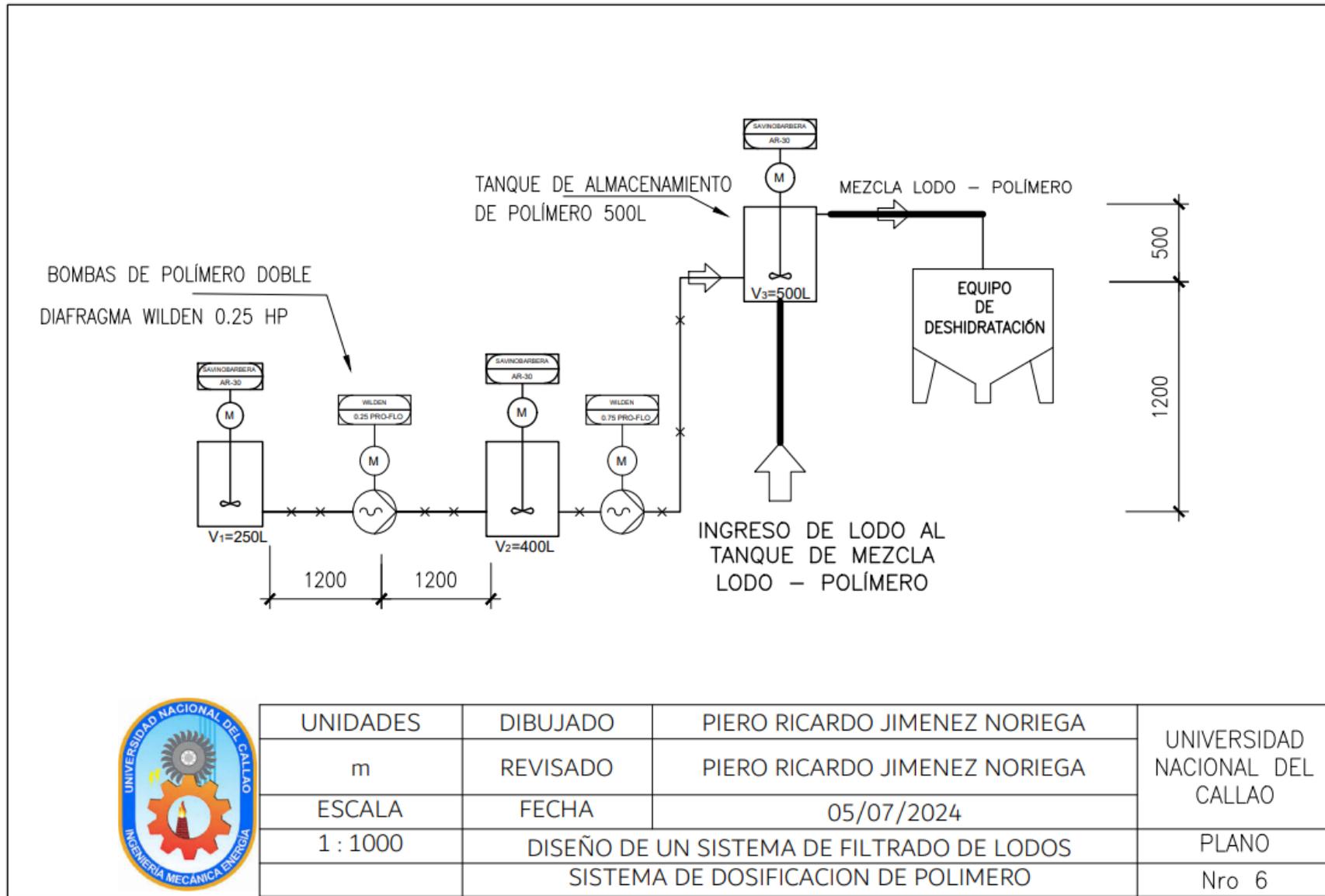
Anexo N° 18: Vista isométrica del sistema de filtrado de lodos.



Anexo N° 19: Esquema en 3D del sistema de filtrado de lodos.

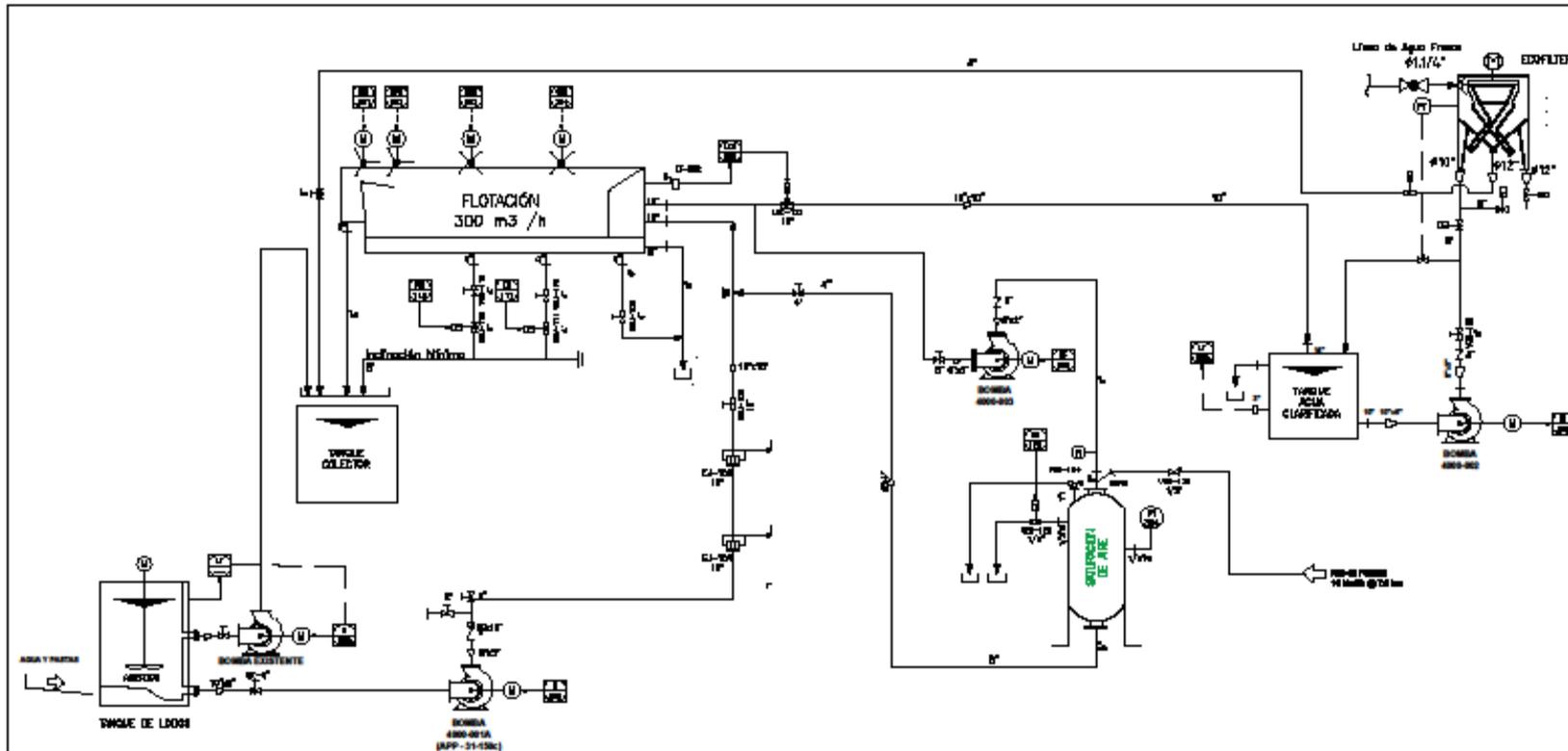


Anexo N° 20: Sistema de dosificación de polímero.



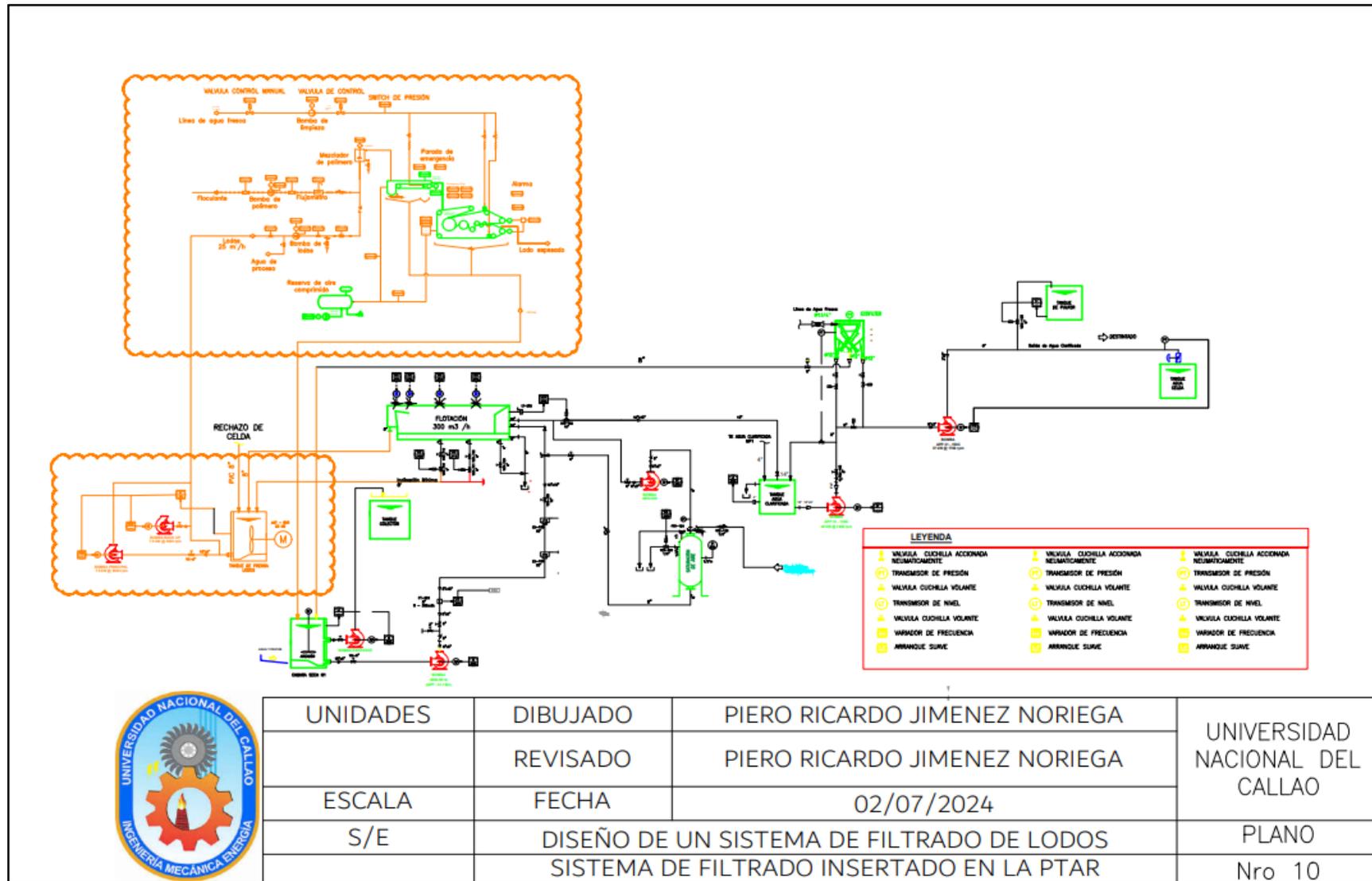
UNIDADES	DIBUJADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
m	REVISADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	
ESCALA	FECHA	05/07/2024	
1 : 1000	DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODOS SISTEMA DE DOSIFICACION DE POLIMERO		PLANO
			Nro 6

Anexo N° 21: Diagrama PID de la PTAR existente.



UNIDADES	DIBUJADO	CHRISTIAN ANDRE ZAVALA RIVERA	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
mm	REVISADO	CHRISTIAN ANDRE ZAVALA RIVERA	
ESCALA	FECHA	02/06/2024	
1 : 1000	DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODOS PID DE PTAR EXISTENTE EN PAPELERA REYES S.A.C		
			PLANO
			Nro 11

Anexo N° 22: PID del Sistema de filtrado de lodos ingresado a la PTAR.



UNIDADES	DIBUJADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
	REVISADO	PIERO RICARDO JIMENEZ NORIEGA	
ESCALA	FECHA	02/07/2024	
S/E	DISEÑO DE UN SISTEMA DE FILTRADO DE LODOS SISTEMA DE FILTRADO INSERTADO EN LA PTAR		PLANO
			Nro 10