

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE
AGUA POTABLE DE TABLADITA DE COSAALT**

Por:

PAOLA SERENA GALEAN AYARDE

**Modalidad: Ampliación, Optimización, y/o Modernización de plantas
industriales existentes.**

**Presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN
MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Química.**

Julio de 2025

TARIJA-BOLIVIA

M.Sc. Ing. Marcelo Segovia Cortez

DECANO

M.Sc. Ing. Fernando Erick Cortez Michel

VIDECANO

APROBADA POR:

TRIBUNAL:

Ing. Héctor Quiroga

Ing. Juan Carlos Vega

Ing. Maybet Orozco

ADVERTENCIA

El tribunal calificador del presente trabajo, no se solidariza con la forma, términos, modos y expresiones vertidas en el mismo, siendo ellos únicamente responsabilidad del autor.

DEDICATORIA

A las personas más importantes de mi vida y las que me dieron el apoyo y amor incondicional en estos cinco años de aprendizajes, mis padres.

AGRADECIMIENTOS

A quienes me dieron el apoyo y amor incondicional en estos cinco años de aprendizajes, mis padres.

A quienes me dieron ejemplo de vida luchando por sus sueños, mis hermanos.

A quien me enseñó que el amor y la amistad van de la mano y me apoyo aun cuando mis ánimos decaían, mi amor bonito.

A quienes supieron acompañarme en el proceso y en los momentos necesarios ayudarme a renovar energías, mis amigas.

En especial a quien a pesar de las adversidades no se rindió y aprendió a llevar este proyecto y sobre todo su proyecto de vida a su ritmo, mi ser.

PENSAMIENTO

Tu tiempo es perfecto, no lo dejes ir
por estar ocupado cumpliendo
expectativas de la sociedad.

ÍNDICE GENERAL

ADVERTENCIA	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
PENSAMIENTO	IV
RESUMEN.....	V

INTRODUCCION

ANTECEDENTES.....	1
OBJETIVOS: GENERAL Y ESPECÍFICOS	3
JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO DE GRADO	4

CAPITULO I

DESCRIPCION DE LA PLANTA

1.1. MATERIA PRIMA	9
1.1.1. FUENTES DE AGUA	9
1.1.2. AGUA POTABLE	9
1.2. LOCALIZACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE.....	9
1.3. DISTRIBUCIÓN DE LA PLANTA POTABILIZADORA DE AGUA	10
1.4. SERVICIOS AUXILIARES	12
1.4.1. SUMINISTRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	12
1.4.2. SUMINISTRO DE AGUA PARA SERVICIOS	12
1.4.3. ALMACENAMIENTO Y DOSIFICACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS	12
1.4.4. LABORATORIO Y CONTROL DE CALIDAD	13
1.4.5. INFRAESTRUCTURA GENERAL.....	13

1.5.	OPERACIÓN Y CONTROL	13
1.5.1.	MEZCLA RÁPIDA/COAGULACIÓN	15
1.5.2.	FLOCULACIÓN	16
1.5.3.	SEDIMENTACIÓN	17
1.5.4.	FILTRACIÓN RÁPIDA	19
1.5.5.	DESINFECCIÓN	20
1.6.	CONCEPTOS Y NORMAS BÁSICAS PARA LA CALIDAD DEL AGUA	23
1.6.1.	PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA	23
1.6.2.	REGLAMENTOS Y NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE..	28
1.6.3.	TOMA DE MUESTRAS Y ANÁLISIS	33
1.6.4.	SELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS A ANALIZAR.....	35

CAPITULO II

CONCEPCION Y DEFINICION DEL PROBLEMA

2.1.	IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	36
2.1.1.	DIAGNÓSTICO DEL FUNCIONAMIENTO ACTUAL DE LA PTAP.....	37
2.1.1.1.	REVISIÓN DE LA PTAP.....	37
2.1.1.2.	TOMA DE MUESTRAS	38
2.1.1.3.	CARACTERIZACIONES FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS..	40
2.1.1.3.1.	DOSIFICACIÓN DE GAS CLORO.....	48
2.1.1.4.	PRUEBAS DE TRATABILIDAD.....	49
2.1.1.5.	PRUEBAS HIDRÁULICAS Y OPERATIVAS	50
2.1.2.	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	53
2.1.2.1.	REVISIÓN DE LA PTAP.....	53
2.1.2.2.	TOMA DE MUESTRAS	63

2.1.2.3. CARACTERIZACIONES FISICOQUÍMICAS Y MICROBIOLÓGICAS..	64
2.1.2.3.1. DOSIFICACIÓN DE GAS CLORO.....	76
2.1.2.4. PRUEBAS DE TRATABILIDAD.....	80
2.1.2.5. PRUEBAS HIDRÁULICAS Y OPERATIVAS	84
2.1.2.5.1. PRUEBAS HIDRÁULICAS.....	84
2.1.2.5.1.1. ANÁLISIS DE PARÁMETROS BÁSICOS DE DISEÑO:	84
2.1.2.5.1.2. MEZCLA RÁPIDA	88
2.1.2.5.1.3. FLOCULACIÓN	90
2.1.2.5.1.4. SEDIMENTACIÓN.....	92
2.1.2.5.1.5. FILTRACIÓN RÁPIDA	94
2.1.2.5.1.6. DESINFECCIÓN.....	96
2.1.2.5.1.7. ALMACENAMIENTO	100
2.1.2.5.2. PRUEBAS OPERATIVAS	102
2.1.2.6. CONCLUSIONES DEL DIAGNOSTICO	103
2.1.2.7. SITUACIÓN ACTUAL DEL PRETRATAMIENTO EN LA PTAP DE TABLADITA	106
2.2. DESCRIPCIÓN DE ALTERNATIVAS TÉCNICAS DE SOLUCIÓN.....	113
2.2.1. ALTERNATIVAS DE REGULACIÓN DE TURBIEDAD	114
2.2.2. ALTERNATIVAS DE REDUCCIÓN DE COLIFORMES TOTALES Y FECALES	119
2.2.3. ALTERNATIVAS PARA HOMOGENEIZACIÓN DEL AGUA.....	120
2.2.4. DISEÑO DE ALTERNATIVAS PROPUESTAS	124
2.2.4.1. DISEÑO ALTERNATIVA I.....	125
2.2.4.2. DISEÑO ALTERNATIVA II	127

2.2.4.3. DISEÑO ALTERNATIVA III.....	130
2.3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN MÁS APROPIADA DE ACUERDO A CRITERIOS APROPIADOS	132
2.3.1. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	132
2.3.2. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	144
2.4. DEFINICIÓN DE CONDICIONES Y CAPACIDAD	145

CAPITULO III

ESPECIFICACION Y DISEÑO DE LA PROPUESTA DE OPTIMIZACION

3.1. DISEÑO DE LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN	148
3.1.1. DISEÑO DE PRESEDIMENTADOR.....	148
3.1.1.1. DESCRIPCIÓN	148
3.1.1.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	148
3.1.1.3. OPERACIÓN DEL SISTEMA.....	151
3.1.1.4. MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD.....	152
3.1.1.5. BENEFICIOS.....	152
3.1.2. PROPUESTA DE SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO PARA DOSIFICACIÓN DE COAGULANTE.....	153
3.1.2.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....	153
3.1.2.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	154
3.1.2.3. OPERACIÓN DEL SISTEMA	156
3.1.2.4. PRUEBAS Y VALIDACIÓN.....	156
3.1.2.5. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.....	157
3.1.2.7. MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD.....	157
3.1.2.8. BENEFICIOS.....	158

3.2. DIAGRAMA DE FLUJO INCLUYENDO LA PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN	160
3.3. BALANCE DE MATERIA	161
3.3.1. CÁLCULOS PARA REALIZAR EL BALANCE DE AGUA.....	162
3.3.2. CÁLCULOS PARA REALIZAR EL BALANCE DE SÓLIDOS EN SUSPENSIÓN	162
3.3.3. BALANCES PARA CADA UNIDAD DE LA PTAP	163
3.3.3.1. BALANCE PARA EL PRESEDIMENTADOR	163
3.3.3.2. BALANCE PARA LA MEZCLA RÁPIDA/COAGULACIÓN	163
3.3.3.3. BALANCE PARA LOS FLOCULADORES	164
3.3.3.4. BALANCE PARA LOS SEDIMENTADORES	165
3.3.3.5. BALANCE PARA LOS FILTROS RÁPIDOS	166
3.3.3.6. BALANCE PARA LA DESINFECCIÓN	166

CAPITULO IV ANALISIS ECONOMICO

4.1. CÁLCULO DE COSTO DE CAPITAL	167
4.2. COSTO DE OPERACIÓN	168
4.3. OPTIMIZACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA	170
4.4. ANALISIS DE RENTABILIDAD	172
4.4.1. VALOR ANUAL EQUIVALENTE	172

CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES	175
5.2. RECOMENDACIONES	176

BIBLIOGRAFÍA	177
--------------------	-----

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO I-1. COORDENADAS DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TABLADITA	10
CUADRO I-2. CARACTERÍSTICAS DEL GAS CLORO	20
CUADRO I-3. PARÁMETROS DE CONTROL MÍNIMO	29
CUADRO I-4. PARÁMETROS DE CONTROL BÁSICO	30
CUADRO II-1. MÉTODOS USADOS EN EL LABORATORIO DE COSAALT PARA INFORMES SEMESTRALES.....	40
CUADRO II-2. MÉTODOS USADOS EN LA PLANTA DE TABLADITA PARA PARÁMETROS DIARIOS.....	41
CUADRO II-3. MÉTODOS USADOS EN EL SEDEGIA EN SEPTIEMBRE DEL 2022.....	42
CUADRO II-4. MÉTODOS USADOS EN COSAALT PARA SEGUIMIENTO DEL RIO GUADALQUIVIR, SEPTIEMBRE 2023.....	43
CUADRO II-5. MÉTODOS USADOS EN COSAALT EN LOS ANÁLISIS.....	45
CUADRO II-6. MÉTODOS USADOS EN EL CEANID EN LOS ANÁLISIS	45
CUADRO II-7. MÉTODOS USADOS EN EL SEDEGIA GESTIÓN 2023	47
CUADRO II-8. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE MEZCLA RÁPIDA	53
CUADRO II-9. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN.....	55
CUADRO II-10. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE SEDIMENTACIÓN	57
CUADRO II-11. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE FILTRACIÓN RÁPIDA	58
CUADRO II-12. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE DESINFECCIÓN.....	60

CUADRO II-13. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE ALMACENAMIENTO	62
CUADRO II-14. VALORES DE PROMEDIOS MENSUALES EN ÉPOCA SECA A LA SALIDA DE LA PLANTA	65
.....	66
CUADRO II-15. VALORES DE PARÁMETROS ANUALES A LA FUENTE DE LAS TIPAS SEPARADOS POR GRUPOS SEGÚN LA NB-689.....	67
CUADRO II-16. VALORES DE PROMEDIOS SEMANALES Y MENSUALES DE PARÁMETROS DIARIOS.....	69
CUADRO II-17. RESULTADOS DE MONITOREO DE SEDEGIA EN 2022 Y 2021.....	71
CUADRO II-18. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DEL SEGUIMIENTO AL RIO GUADALQUIVIR REALIZADOS POR COSAALT EN SEPTIEMBRE 2023.	71
CUADRO II-19. RESULTADOS DE COSAALT Y CEANID EN PRIMER MONITOREO DE LA ESTUDIANTE.	73
CUADRO II-20. RESULTADOS DE COSAALT Y CEANID EN SEGUNDO MONITOREO DE LA ESTUDIANTE.	73
CUADRO II-21. RESULTADOS DEL SEDEGIA EN OCTUBRE DE 2023.....	75
CUADRO II-22. RESULTADOS CONCENTRACIONES DE CLORO LIBRE Y CLORO AGREGADO-DÍA 1	76
CUADRO II-23. RESULTADOS CONCENTRACIONES DE CLORO LIBRE Y CLORO AGREGADO-DÍA 2	78
CUADRO II-24. RESULTADOS CONCENTRACIONES DE CLORO RESIDUAL EN PUNTOS MÁS ALEJADOS DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN.....	79
CUADRO II-25. CONDICIONES INICIALES DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD-PRUEBA 1	80

CUADRO II-26. RESULTADOS PRUEBAS DE TRATABILIDAD-PRUEBA 1...	81
CUADRO II-27. CONDICIONES INICIALES DE PRUEBAS DE TRATABILIDAD-PRUEBA 2.....	83
CUADRO II-28. RESULTADOS PRUEBAS DE TRATABILIDAD-PRUEBA 2...	83
CUADRO II-29. PARÁMETROS DE DISEÑO MEZCLA RÁPIDA.....	88
CUADRO II-30. PARÁMETROS DE DISEÑO FLOCULACIÓN.....	90
CUADRO II-31. PARÁMETROS DE DISEÑO SEDIMENTACIÓN	92
CUADRO II-32. PARÁMETROS DE DISEÑO FILTRACIÓN RÁPIDA	94
CUADRO II-33. CÁLCULO DE CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO.....	100
CUADRO II-34. CUADRO DE ANÁLISIS DE FALENCIAS	103
CUADRO II-35. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE CRIBADO O CERNIDO	107
CUADRO II-36. FICHA TÉCNICA DE LA UNIDAD DE CÁRCAMO DE SEDIMENTACIÓN	109
CUADRO II-37. PARÁMETROS DE DISEÑO CRIBADO O CERNIDO	110
CUADRO II-38. PARÁMETROS DE DISEÑO CÁRCAMO DE SEDIMENTACIÓN	111
CUADRO II-39. CUADRO DE ASPECTOS A MEJORAR Y ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	124
CUADRO II-40. COSTOS ALTERNATIVA I.....	127
CUADRO II-42. COSTOS ALTERNATIVA III	131
CUADRO II-43. MATRIZ I DE DECISIÓN PARA ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	134
CUADRO II-44. MATRIZ II DE DECISIÓN PARA ALTERNATIVAS PROPUESTAS.....	135

CUADRO II-45. DESCRIPCIÓN Y CALIFICACIÓN	138
CUADRO II-46. SELECCIÓN DE ALTERNATIVA	144
CUADRO III-1. PARÁMETROS DE DISEÑO DEL PRESEDIMENTADOR PROPUESTO	148
CUADRO III-2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BOMBA GRUNDFOS DMX	154
CUADRO IV-1. COSTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA UNIDAD DE PRESEDIMENTACIÓN	167
CUADRO IV-2. COSTOS DE INSTALAR EL SISTEMA SEMIAUTOMÁTICO	168
CUADRO IV-3. COSTOS ACTUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LA PTAP EN ÉPOCA SECA.....	169
CUADRO IV-4. COSTOS ESTIMADOS DE O Y M DE LA PTAP CON LAS SOLUCIONES PROPUESTAS.....	169
CUADRO IV-5. COSTO TOTAL DE INVERSIÓN INICIAL	172
CUADRO IV-6. INVERSIÓN INICIAL Y COSTOS POR ÉPOCA ANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO	173
CUADRO IV-7. VARIABLE DE EFICACIA	174

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1. LOCALIZACIÓN SATELITAL DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE TABLADITA	10
FIGURA 1-2. PLANO DE LA DISTRIBUCION DE LA PTAP	11
FIGURA 1-3. PLANTA DE TRATAMIENTO.....	11
FIGURA 1-4. PROCESO DE POTABILIZACIÓN.....	14
FIGURA 1-5. UNIDAD DE MEZCLA RÁPIDA	15
FIGURA 1-6. UNIDAD DE FLOCULACIÓN	16
FIGURA 1-7. UNIDAD DE SEDIMENTACIÓN	18
FIGURA 1-8. UNIDAD DE FILTRACIÓN RÁPIDA.....	19
FIGURA 1-9. UNIDAD DE DESINFECCIÓN	21
FIGURA 1-10. UNIDAD DE ALMACENAMIENTO	22
FIGURA 2-1. TOMA DE DATOS DE LAS UNIDADES.....	38
FIGURA 2-2. TOMA DE MUESTRA EN LA ENTRADA DE LA PLANTA.	39
FIGURA 2-3. TOMA DE MUESTRA EN LA SALIDA DE LA PLANTA.....	39
FIGURA 2-4. MUESTRAS EN CADENA DE FRÍO.....	39
FIGURA 2-5. INFORME ANUAL 2022 DEL DEPARTAMENTO DE CONTROL DE CALIDAD DE COSAALT.....	41
FIGURA 2-6. EJEMPLO DE CONTROL DE PARÁMETROS DIARIOS 2023	41
FIGURA 2-7. INFORME TEMPORADA SECA 2022, SEDEGIA	43
FIGURA 2-8. INFORME DE SEGUIMIENTO DEL RIO GUADALQUIVIR, COSAALT	44
FIGURA 2-9. INFORME DEL MONITOREO, COSAALT	45
FIGURA 2-10. INFORME DEL MONITOREO, CEANID.....	46

FIGURA 2-11. INFORME TEMPORADA SECA 2023, SEDEGIA	48
FIGURA 2-12. ESTUDIANTE HACIENDO EL REGISTRO DE LA DOSIFICACIÓN DE GAS CLORO.....	49
FIGURA 2-13. ENSAYO DE JARRAS	49
FIGURA 2-14. FORMACIÓN DE FLOCS Y SEDIMENTACIÓN	50
FIGURA 2-15. CONSULTAS A TÉCNICO PTAP	51
FIGURA 2-16. CONSULTAS A OPERARIO PTAP	51
FIGURA 2-17. MEDICIÓN DE DATOS DE LA UNIDAD DE MEZCLA RÁPIDA	51
FIGURA 2-18. MEDICIÓN DE DATOS DE LA UNIDAD DE FLOCULACIÓN ..	52
FIGURA 2-19. MEDICIÓN DE DATOS DE LA UNIDAD DE FILTRACIÓN	52
FIGURA 2-20. TOMA DE DATOS IN SITU	64
FIGURA 2-21. DATOS IN SITU DEL MONITOREO	64
FIGURA 2-22. CURVA DE COMPORTAMIENTO-DÍA 1	76
FIGURA 2-23. CURVA DE COMPORTAMIENTO-DÍA 2	78
FIGURA 2-24. DOSIS OPTIMA DE ENSAYO DE JARRAS CON AJUSTE SIMULTANEO.....	81
FIGURA 2-25. DESCRIPCIÓN DE UNIDAD DE DOSIFICACIÓN COMPACTA VGB-103	97
FIGURA 2-26. DIFUSOR PARA TUBERÍAS DE DIÁMETROS MAYORES A LAS 36”	99
FIGURA 3-1. PRESEDIMENTADOR.....	150
FIGURA 3-2. UBICACIÓN PRESEDIMENTADOR	151
FIGURA 3-3. DIBUJO VARIANTE DE BOMBA GRUNDFOS DMX PROPUESTA	155

FIGURA 3-4. UBICACIÓN DE BOMBA DOSIFICADORA GRUNDFOS DMX 156

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1

DETALLES DE IMPLEMENTACIÓN DE LA BOMBA GRUNDFOS DMX

ANEXO 2

DETALLES PARA EL MANTENIMIENTO Y SEGURIDAD DE LA BOMBA
GRUNDFOS DMX

ANEXO 3

REGISTRO FOTOGRÁFICO

NOMENCLATURAS, ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

,	Decimal
%	Porcentual
Kg	Kilogramo
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
M	metro
L	Litros
S	Segundo
Mg	Miligramo
G	Gramos
Cm	Centímetro
Mm	Milímetro
Min	Minuto
μS	Micro siemens
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbidez
UFC	Unidades Formadoras de Colonias
NMP	Número Más Probable
UCV	Unidad de Control de Vertido
SM	Método estándar
°C	Grados Celsius
BTU	Unidad térmica británica
Qmd	Caudal medio diario
P	Población
D	Dotación

Qmaxd	Caudal máximo diario
PVC	Policloruro de vinilo
AWWA	Asociación americana de trabajos en agua
LOU	Laboratorio de operaciones unitarias
CEANID	Centro de análisis investigación y desarrollo
CIAGUA	Centro de Investigación del Agua
NB	Norma Boliviana
SEDEGIA	Servicio Departamental de Gestión Integral del Agua
SIHITA	Sistema de Información Hídrica de Tarija
COSAALT	Cooperativa de Servicios Públicos de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario Tarija
PTAP	Planta de tratamiento de agua potable
PH	Potencial de Hidrógeno
FFD	Fierro Fundido Dúctil
TH	Título hidrométrico
ppm	Partes por millón
DBO	Demanda biológica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
OD	Oxígeno Disuelto
EPSA	Entidad Prestadora de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario
UAJMS	Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
GADT	Gobierno autónomo departamental de Tarija
OMS	Organización Mundial de la Salud

FAD	Flotación por Aire Disuelto
SPD	Subproductos de Desinfección
TRH	Tiempo de Retención Hidraulico
VSS	Velocidad de Sedimentación Superficial
EPP	Equipo de Protección Personal
POE	Procedimiento Operativo Estandar