

**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 enseño 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

## 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 DISTRIBUACION 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
$\mu$ S	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
$^{\circ}$ 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