

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO

ORAS HIDRÁULICAS Y SANITARIAS



**“CONSUMO MÁXIMO DE OXÍGENO DIARIO DE LOS REACTORES
BIOLÓGICOS DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO DE LODOS ACTIVADOS
DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE SAN BLAS DE LA CIUDAD DE
TARIJA”**

Por:

KEVIN DAVID CONDORI QUISPE

Proyecto de Grado presentado a consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO”, como requisito para optar el Grado Académico de Licenciatura en Ingeniería Civil.

SEMESTRE II - 2023

TARIJA – BOLIVIA

DEDICATORIA:

Al Dios creador de todo en el universo.

A las personas que más amamos en la vida, nuestros padres y familia a los que debemos mucho por su abnegada entrega al impulsarnos en un camino recto y de valores, y por darnos la oportunidad de ser hombres de bien, día tras día bajo su compañía

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Selección y definición del tema del proyecto.	1
1.1.1. Ubicación geográfica del proyecto de grado.....	1
1.1.2. Latitud y longitud.....	1
1.1.3. Límites territoriales.....	1
1.2. Antecedentes.	2
1.3. Problemática actual.	3
1.4. Formulación del problema.	4
1.5. Justificación.	4
1.6. Objetivos.	5
1.6.1. Objetivo General.....	5
1.6.2. Objetivos Específicos.....	5
1.7. Marco de referencia.	5
1.7.1. Marco espacial.	5
1.7.2. Marco temporal.....	5
1.8. Alcance.....	6

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DEL TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	7
2.1. Tipo de tratamiento.	7
2.1.1. Variabilidad temporal de datos afluentes de PTARs.	9
2.1.2. Marco conceptual.....	10
2.2. Principios del Proceso de Lodos Activados.....	11
2.3. Reacciones en el sistema de Lodos Activados.....	13
2.3.1. Oxidación de la materia orgánica.....	13
2.3.2. Nitrificación.	15
2.3.3. Desnitrificación.....	16
2.4. Configuraciones del sistema de lodos activados.....	17
2.5. Efluentes de Aguas Residuales.	20
2.6. Configuración física del reactor de lodos activados.	20

2.7. Parámetros operacionales del sistema de lodos activados.	21
2.8. Normativa Boliviana en materia de Aguas Residuales Urbanas.....	23
2.9. Situación actual de las Plantas de Tratamiento.....	27
2.9.1. Presencia de Plantas de Tratamiento en Bolivia.....	27
2.9.2. Tipos de PTAR.....	30
2.9.3. Funcionamiento y Eficiencia.....	32
2.10. Modelado de un proceso de lodos activados.....	33
2.10.1. Definiciones básicas de un modelo.....	33
2.10.2. Aplicaciones prácticas del modelado.....	35
2.10.3. Modelos en el proceso de lodos activados.....	36
2.11. Modelo de Lodos Activados N° 1 (ASM1).....	37
2.11.1. Reseña del modelo ASM1.....	38
2.11.2. Componentes del modelo ASM1.....	40
2.11.3. Procesos biológicos del modelo ASM1.....	43
2.11.4. Parámetros del modelo ASM1.....	45
2.12. Casos de simulación de procesos de lodos activados.....	46
2.12.1. Antecedentes a nivel Nacional.....	46
2.12.2. Antecedentes a nivel Internacional.....	47
2.13. Características de las Aguas Residuales.....	49
2.13.1. Características Físicas, Químicas y Biológicas del Agua Residual.....	52
2.13.2. Caso del Departamento de Tarija.....	53
2.13.3. Otros casos en Latinoamérica.....	54
2.14. Caracterización de las aguas residuales.....	55
2.15. Modelado del sedimentador secundario.....	56
2.16. Hidrodinámica del proceso.....	57
2.17. MATLAB.....	58
2.18. Procesos y Operaciones Unitarias del Tratamiento de Aguas Residuales.....	59
2.18.1. Operaciones Físicas Unitarias.....	59
2.18.2. Procesos Químicos Unitarios.....	59
2.18.3. Procesos Biológicos Unitarios.....	60
2.18.4. Aplicación de los Procesos en el Tratamiento de Aguas Residuales.....	60

2.19. Recuperación y Reutilización de Efluentes.	61
2.20. Descripción general de la PTAR de San Blas.....	61
2.20.1. Parámetros de diseño de la planta.	61
2.20.2. Configuración del tratamiento de la PTAR.....	62

CAPÍTULO III

DESCRIPCIÓN DE LOS MODELOS DE LODOS ACTIVADOS

EN LA ACTUALIDAD	67
3.1. Otros Modelos Biocinéticos.....	67
3.2. Comparación entre el ASM1 y ASM3	68
3.3. Protocolos de calibración del proceso de lodos activados.	69
3.4. El futuro del modelado de lodos activados.	73
3.5. Descripción de la metodología ASM1 en la PTAR de San Blas	73
3.5.1. Protocolo Unificado de las Buenas Prácticas de Modelado.....	74
3.5.2. Recolección y reconciliación de datos.	76
3.5.3. Detección del error.....	79
3.5.4. Aislamiento del error.	79
3.5.5. Identificación del error.....	80
3.5.6. COSSALT.....	81
3.6. Configuración del modelo de planta.	81
3.6.1. Distribución de la planta.	81
3.6.2. Estructura de los submodelos.....	82
3.6.3. Conexiones con la base de datos.....	85
3.6.4. Configuración de la salida.....	85
3.6.5. Verificación del modelo.....	86
3.7. Calibración.	88
3.7.1. Definición de error aceptable.....	88
3.7.2. Corrida inicial del modelo.....	88
3.8. Cálculo del consumo máximo de oxígeno.	90
3.9. Relleno de datos de entrada a la PTAR.....	91

CAPÍTULO IV

INFORMACIÓN RECOPIADA Y CONFIGURACIÓN DEL MODELO DE PTAR	95
--	----

4.1. Análisis de la Información Recabada.....	99
4.1.1. Análisis de la información recabada de COSAALT.....	99
4.2. Caracterización de las aguas residuales de la planta de tratamiento de San Blas.	108
4.2.1. Caudales.....	108
4.2.2. Concentraciones.....	110
4.2.3. Relleno de datos a nivel horario.....	113
4.3. Balances de masa.	115
4.4. Configuración del modelo de la planta de tratamiento	118
4.4.1. Caracterización de aguas residuales del afluente.....	119
4.5. Verificación del programa de simulación.	123
CAPÍTULO V	
CALIBRACIÓN DEL MODELO (RESULTADOS Y DISCUSIÓN).....	125
5.1. Análisis de sensibilidad.....	125
5.2. Resultados del programa calibrado.	128
CAPÍTULO VI	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	137
6.1. Conclusiones.....	137
6.2. Recomendaciones.....	139
BIBLIOGRAFÍA.....	141
ANEXO 1.....	147
MATRIZ DEL MODELO ASM1	147
ANEXO 2.....	148
PARÁMETROS DEL MODELO ASM1.....	148
ANEXO 3.....	149
TIPOS DE TRATAMIENTO BIOLÓGICO PARA AGUAS RESIDUALES.....	149
ANEXO 4.....	151
CONCENTRACIONES TÍPICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	
MUNICIPALES.....	151
ANEXO 5.....	152

RELACIONES MÁSCAS TÍPICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	
MUNICIPALES	152
ANEXO 6	153
SUBMODELOS INVOLUCRADOS EN EL PROCESO DE LODOS	
ACTIVADOS	153
ANEXO 7	154
MODELOS TÍPICOS DE CLARIFICADORES PARA LA SIMULACION	
CON ASM	154
ANEXO 8	155
INFORMACIÓN PROPORCIONADA POR LA PLANTA DE	
TRATAMIENTO DE SAN BLAS.....	155
ANEXO 9	159
PERFILES HORARIOS DE CAUDALES DE PURGA Y RECIRCULACIÓN	
(FECHA 19/02/2023)	159
ANEXO 10	160
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS RECOPIADOS DE	
CAUDALES Y CONSUMOS DE LA PTAR SAN BLAS.....	160
ANEXO 11	161
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS RECOPIADOS DE	
CAUDALES CONCENTRACIONES DE LA PTAR SAN BLAS.....	161
ANEXO 12	162
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LOS DATOS RECOPIADOS DE LAS	
CONDICIONES AMBIENTALES DE LA PTAR SAN BLAS.....	162
ANEXO 13	163
BALANCES DE MASA DE SSI PARA EL AJUSTE DE LOS CAUDALES DE	
LA PTAR SAN BLAS	163
ANEXO 14	164
EXPRESIONES CINÉTICAS Y BALANCES DE MASA DEL MODELO ASM1	164
ANEXO 15	168
MODELO <i>CODFRACTIONS</i> DEL INFLUENT ADVISOR	168
ANEXO 16	170

CÓDIGO EN MATLAB® DEL PROGRAMA DE SIMULACION DE LA PTAR DE SAN BLAS	170
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación Geográfica del Proyecto	1
Figura 2.1. Variación horaria de entrada a una planta de tratamiento de aguas domésticas.	9
Figura 2.2. Representación simple del sistema de lodos activados.	12
Figura 2.3. Representación esquemática de los procesos para la remoción de materia orgánica.	14
Figura 2.4. Representación esquemática de las diferentes formas del material nitrogenado presente en las aguas residuales y sus reacciones.	17
Figura 2.5. Representación esquemática de las configuraciones de lodos activados.	19
Figura 2.6. Presencia de PTAR en estudios realizados en Bolivia.....	30
Figura 2.7. Presencia de PTAR reguladas por la AAPS por departamentos en 2020.	30
Figura 2.8. Tecnologías identificadas en las PTAR estudiadas.....	31
Figura 2.9. Operación de PTAR en estudios realizados en Bolivia.	32
Figura 2.10. Efectividad en PTAR con base en DQO en estudios realizados en Bolivia. ...	33
Figura 2.11. Conexión entre el mundo real y un modelo de planta.....	34
Figura 2.12. Clasificación de modelos de un sistema.....	35
Figura 2.13. Aplicaciones del modelado matemático de sistemas de lodos activados.....	36
Figura 2.14. Representación esquemática de un modelo completo de sistema de lodos activados.	37
Figura 2.15. Fraccionamiento de la DQO de la materia orgánica según el modelo ASM1.	41
Figura 2.16. Fraccionamiento del Nitrógeno según el ASM1.....	42
Figura 2.17. Esquema general del modelo ASM1.....	43
Figura 2.18. Esquema de fuentes de agua, usos benéficos y necesidad de tratamiento.	51
Figura 2.19. Diagrama de flujo de proceso PTAR de San Blas.	65
Figura 2.20. Vista en planta de la PTAR de San Blas.....	66
Figura 3.1. Comparación de los modelos ASM1 y ASM3.....	69
Figura 3.2. Etapas del Protocolo Unificado de las Buenas Prácticas de Modelado.	76
Figura 3.3. Procedimiento para la recolección y reconciliación de datos.	77
Figura 3.4. Pasos para la reconciliación de los datos.	78

Figura 3.5. Pasos para la configuración del modelo de planta.	81
Figura 3.6. Diagrama de flujo general para la simulación del modelo ASM1 en estado estacionario.....	87
Figura 3.7. Reparto de consumos de oxígeno en relación con la carga de DBO ₅	90
Figura 4.1. Esquema de Flujo de tratamiento de la PTAR de San Blas.	97
Figura 4.2. Esquema simplificado del Flujo de tratamiento de la PTAR de San Blas.	98
Figura 4.3. Perfil horario del afluente y efluente de la PTAR San Blas del día 19/02/23.....	109
Figura 4.4. Concentraciones de DQO total, DBO ₅ , SST y SSV en el afluente en el mes de febrero.	111
Figura 4.5. Concentraciones de DQO total, DBO ₅ , SST y SSV en el afluente en el mes de febrero	112
Figura 4.6. Concentración de SST en la recirculación y los reactores A y B en el mes de febrero.	112
Figura 4.7. Curva distribución horaria para la PTAR en el mes de febrero.	114
Figura 4.8. Curva distribución horaria de concentraciones para la PTAR en el mes de febrero.	114
Figura 4.9. Sistemas usados para los balances de masa con los SST.	116
Figura 4.10. Composición de la materia orgánica (DQO total).....	122
Figura 4.11. Composición de la materia nitrogenada (N total)	122
Figura 5.1. Concentración de componentes solubles en el licor mezclado durante todo el tiempo de simulación de la planta (t=100 días).....	129
Figura 5.2. Concentración de componente particulados I en el licor mezclado durante todo el tiempo de simulación de la planta (t=100 días).....	129
Figura 5.3. Concentración de componente particulados II en el licor mezclado durante todo el tiempo de simulación de la planta (t=100 días).....	130
Figura 5.4. Concentración de variables de estado I en todos los tanques CSTR del modelo de planta (perfil de concentraciones).....	131
Figura 5.5. Concentración de variables de estado II en todos los tanques CSTR del modelo de planta (perfil de concentraciones).....	131

Figura 5.6. Concentración de variables de estado III en todos los tanques CSTR del modelo de planta (perfil de concentraciones).....	132
Figura 6.1. Comparación de resultados del modelo ASM1 de las variables de salida (efluente).....	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Mecanismos predominantes de la línea de Tratamiento de Aguas Residuales.	8
Tabla 2.2. Tipos de agua.....	10
Tabla 2.3. Tipos de microorganismos y características principales de su metabolismo.	13
Tabla 2.4. Parámetros de operación típicos para procesos de lodos activados según el tipo de reactor.	21
Tabla 2.5. Descripción de las principales configuraciones físicas de reactores de lodos activados.	22
Tabla 2.6. Clasificación de los cuerpos de agua según su aptitud de uso.	25
Tabla 2.7. Límites permisibles para descargas líquidas en mg/l.	26
Tabla 2.8. Valores máximos admisibles de parámetros cuerpos receptores.	27
Tabla 2.9. Población de EPSA reguladas con Alcantarillado Sanitario, Tratamiento de Aguas Residuales y número de PTAR (2021).....	28
Tabla 2.10. Niveles de tratamiento por departamentos en Bolivia.....	31
Tabla 2.11. Variables de estado del modelo ASM1.	42
Tabla 2.12. Casos de aplicación del modelo ASM1 en la simulación de plantas de tratamiento de lodos activados.	48
Tabla 2.13. Características físicas, químicas y biológicas del agua residuales.....	52
Tabla 2.14. Parámetros de las aguas residuales afluentes de EPSAS del departamento de Tarija.....	54
Tabla 2.15. Relaciones de interés de las aguas residuales en algunas regiones de Latinoamérica.	55
Tabla 2.16. Caudales de Diseño y Operación PTAR de San Blas.....	62
Tabla 2.17. Parámetros de la calidad del afluente de la PTAR de San Blas.	62
Tabla 3.1. Modelos biocinéticos del proceso de lodos activados.....	67
Tabla 3.2. Fortalezas debilidades, oportunidades e inconvenientes de los diferentes protocolos de calibración.....	71
Tabla 3.3. Población Equivalente de la PTAR de San Blas.	74
Tabla 3.4. Tipos de datos recolectados para el presente estudio.	78
Tabla 3.5. Esquema de flujo representativo de la hidráulica del sistema de lodos activados de la PTAR de San Blas.	82

Tabla 3.6. Características de las unidades del proceso de lodos activados de la PTAR de San Blas.	83
Tabla 3.7. Valores promedio del flujo de agua residual rica en orina.	92
Tabla 3.8. Valores de factores por defecto.	92
Tabla 4.1. Código de identificación de los componentes de la PTAR de San Blas.	95
Tabla 4.2. Datos diarios del agua residual afluyente del mes de febrero de la PTAR San Blas.	99
Tabla 4.3. Datos diarios del agua residual efluente del mes de febrero de la PTAR San Blas.	101
Tabla 4.4. Datos diarios de la recirculación del mes de febrero de la PTAR San Blas.	102
Tabla 4.5. Datos diarios de la purga del mes de febrero de la PTAR San Blas.	103
Tabla 4.6. Datos diarios de los reactores del mes de febrero de la PTAR San Blas.	104
Tabla 4.7. Selección del día representativo afluyente para los perfiles horarios.	106
Tabla 4.8. Valores de factores obtenidos de la PTAR.	107
Tabla 4.9. Distribución horaria del afluyente en el mes de febrero aplicando series de Fourier.	107
Tabla 4.10. Promedio de caudales y concentraciones de carga orgánica y nitrogenada de todos los flujos del sistema del mes de febrero (antes de realizar el ajuste de balances de masa).	113
Tabla 4.11. Caudales usados para los balances de masa de SST.	116
Tabla 4.12. Comparación de los parámetros operacionales de la planta del mes de febrero.	118
Tabla 4.13. Porcentaje de error de los caudales medidos del mes de febrero.	118
Tabla 4.14. Coeficientes estequiométricos del modelo <i>CODfractions</i>	120
Tabla 4.15. Resultados de la caracterización del afluyente en mg/L (variables de estado).	120
Tabla 4.16. Otras variables compuestas de interés.	121
Tabla 4.17. Composición de la materia orgánica del afluyente reportados en la literatura.	122
Tabla 4.18. Resultados del ejemplo de Henze con el programa computacional.	123
Tabla 4.19. Porcentajes de desviación de simulación del ejemplo Henze.	124

Tabla 5.1. Resultados del análisis de sensibilidad para las variables de estado del licor mezclado.....	126
Tabla 5.2. Resultados del análisis de sensibilidad para las variables de salida (efluente y otros parámetros).....	127
Tabla 5.3. Valores de Parámetros ASM1 por defecto, ajustado y % de variación.....	135
Tabla 5.4. Resultados de las variables de salida, errores y sus rangos aceptables	136
Tabla 5.5. Porcentaje de remoción de los contaminantes del agua residual.....	136
Tabla A1. Matriz de Variables y procesos del modelo ASM1.....	147
Tabla A2. Parámetros cinéticos y estequiométricos del modelo ASM1.	148
Tabla A3. Principales procesos de tratamiento biológico usado para aguas residuales.	149
Tabla A4. Características típicas de las aguas residuales municipales.....	151
Tabla A5. Síntesis de las relaciones típicas de PTAR municipales a partir del cuestionario GMP.....	152
Tabla A6. Submodelos comunes en un proceso de lodos activados.	153
Tabla A7. Modelos comunes de clarificadores.	154
Tabla A8.1. Datos operativos reconciliados del laboratorio del mes de febrero de la PTAR San Blas.....	155
Tabla A10.1. Estadística de los caudales del afluente, efluente y recirculación del mes de febrero de 2023.....	160
Tabla A11.1. Estadística de las concentraciones de materia orgánica, particulada y nitrogenada del afluente (febrero).	161
Tabla A11.2. Estadística de las concentraciones de materia orgánica, particulada y nitrogenada del efluente (febrero).	161
Tabla A11.3. Estadística de las concentraciones de sólidos en los reactores A y B, y la recirculación (entre abril, mayo).....	161
Tabla A12.1. Estadística del pH, temperatura y OD del afluente y efluente del mes de febrero	162
Tabla A12.2. Estadística del pH, temperatura y OD del reactor A y B del mes de febrero.....	162

Tabla A13. Balances de masa respecto a los SST para el ajuste de los caudales del sistema de lodos activados de la PTAR San Blas.....	163
Tabla A15. Coeficientes y ecuaciones para calcular variables ASM1 y compuestas.	169