

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“MODELACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES VIACHA (LA PAZ) EMPLEANDO SOFTWARE  
GPS-X”**

**Por:**

**ROCIO ALEJANDRA ROCHA IÑIGUEZ**

**SEMESTRE II - 2023**

**TARIJA-BOLIVIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA “JUAN MISAEL SARACHO”**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA Y OBRAS SANITARIAS**

**“MODELACIÓN DE LA OPERACIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO  
DE AGUAS RESIDUALES VIACHA (LA PAZ) EMPLEANDO SOFTWARE  
GPS-X”**

**Por:**

**ROCIO ALEJANDRA ROCHA IÑIGUEZ**

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**

A mis padres, Alejandro Rocha y Flora Iñiguez, a mis hermanos, Rogelio y Alexander, por el apoyo incondicional que me brindaron para poder culminar esta etapa de mi vida.

A mi querido Tony J. por ser mi compañero en todo momento.

# ÍNDICE GENERAL

## CAPÍTULO I

### GENERALIDADES

	<b>Página.</b>
1.1.Introducción .....	1
1.2. Planteamiento del problema .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo General .....	3
1.3.2. Objetivos Específicos .....	3
1.4. Hipótesis .....	3
1.5. Justificación .....	4
1.5.1. Justificación Científica .....	4
1.5.2. Justificación Técnica .....	4
1.5.3. Justificación Social .....	4
1.5.4. Justificación Económica .....	5

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

	<b>Página.</b>
2.1. Aguas residuales .....	5
2.1.1. Definición .....	5
2.1.2. Origen y clasificación de las aguas residuales .....	5
2.1.3. Características de las Aguas Residuales .....	6
2.1.4. Marco Normativo .....	16
2.2. Tratamiento de aguas residuales .....	18
2.3. Planta de tratamiento de aguas residuales “Viacha (La Paz)” .....	19
2.3.1. Tratamiento aplicado en la PTAR “Viacha (La Paz)” .....	20
2.4. Tratamiento con lodos activados .....	31
2.4.1. Introducción .....	31

2.4.2. Procedimiento para el llenado .....	32
2.4.3. Control del flujo de los lodos de retorno .....	33
2.4.4. Control del proceso biológico .....	33
2.5. Fundamentos de modelado y simulación de una P.T.A.R.....	35
2.5.1. Fundamentos de los modelos para PTAR .....	36
2.5.2. Ventajas y Limites del modelado dinámico .....	37
2.5.3. Software de modelado y simulación GPS-X .....	38

### **CAPÍTULO III**

#### **MARCO METODOLÓGICO**

	<b>Página.</b>
3.1. Tipo de investigación .....	41
3.2. Fuentes de información .....	41
3.3.1. Datos de la caracterización del Agua Residual .....	41
3.3.2. Especificaciones técnicas del tren de tratamiento de la PTAR “Viacha” .....	42

### **CAPÍTULO IV**

#### **DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

	<b>Página.</b>
4.1. Introducción .....	45
4.2. Construcción del modelo .....	45
4.3. Ajuste del modelo .....	48
4.4. Desarrollo de escenarios .....	53
4.5. Simulación de los escenarios .....	55
4.6. Análisis del tren de tratamiento de Viacha .....	136

4.7. Análisis de resultados .....	137
4.8. Análisis de sensibilidad del software GPS-X .....	138

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

	<b>Página.</b>
5.1. Conclusiones .....	141
5.2. Recomendaciones .....	141
<b>BIBLIOGRAFÍA Y WEBGRAFÍA .....</b>	<b>143</b>

- Bibliografía
- Webgrafía

## **ANEXOS.**

**ANEXO 1** – Proceso de construcción del modelo y simulación de escenario.

**ANEXO 2** – Informe de laboratorio de análisis físico-químico de agua residual.

**ANEXO 3** – Resumen ejecutivo de: estudio a diseño final “Construcción P.T.A.R. y emisarios Viacha (la paz)”.

**ANEXO 4** – Planos de construcción de la P.T.A.R. Viacha (La Paz).

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Página.</b>
Tabla 1: Características de las aguas residuales urbanas. ....	16
Tabla 2: Límites permisibles para descargas líquidas en cuerpos receptores. ....	17
Tabla 3: Valores máx. admisibles de parámetros indicadores de contaminación. ....	17
Tabla 4: Caracterización del agua residual de diseño .....	40
Tabla 5: Análisis físico-químico de agua residual .....	41
Tabla 6: Datos relevantes de cada componente de la PTAR .....	41
Tabla 7: Resumen de objetos insertados al tablero de dibujo del programa Gps-X. ....	45
Tabla 8: Resumen de calibración del escenario N°1 .....	52
Tabla 9: Resumen de calibración del escenario N°2 .....	53
Tabla 10: Resultados de simulación en el Influyente, para el esc. N°1. ....	55
Tabla 11: Resultados de simulación en el cárcamo de bombeo, para el esc. N°1. ....	56
Tabla 12: Resultados de la simulación en el desarenador, para el esc. N°1. ....	57
Tabla 13: Resultados de simulación de la entrada a la zanja de ox., esc. N°1 .....	58
Tabla 14: Resultados de simulación de recirculación a la zanja de ox., esc. N°1. ....	59
Tabla 15: Resultados de simulación de la salida a la zanja de ox., esc. N°1. ....	59
Tabla 16: Resultados de simulación en la entrada del clarif. sec., para el esc. N°1. ....	65
Tabla 17: Resultados de simulación de sobrenadante del clarif. sec., esc. N°1 .....	66
Tabla 18: Resultados de simulación de lodo sedimentado del clarif. sec. esc. N°1. ....	66
Tabla 19: Resultados de simulación del Q de lodo en el lecho de sec.1- esc. N°1 .....	70
Tabla 20: Resultados de simulación de lixiviados en el lecho de sec.1-esc. N°1 .....	71
Tabla 21: Resultados de simulación de lodo desh. en el lecho de sec.1- esc. N°1. ....	71
Tabla 22: Resultados de simulación del Q de lodo en el lecho de sec.2-esc. N°1 .....	75
Tabla 23: Resultados de simulación de lixiviados en el lecho de sec.2-esc. N°1 .....	76
Tabla 24: Resultados de simulación de lodo desh. en el lecho de sec.2-esc. N°1. ....	76
Tabla 25: Resultados de simulación a la entrada de la desinfección - esc. N°1. ....	80
Tabla 26: Resultados de simulación en la salida de la desinfección-esc. N°1 .....	81
Tabla 27: Resultados de simulación del lodo deshidratado 1, para el esc. N°1 .....	85
Tabla 28: Resultados de simulación del lodo deshidratado 2, para el esc. N°1 .....	86

Tabla 29: Resultados de simulación en la descarga de la PTAR, para el esc. N°1.....	87
Tabla 30: Eficiencia de remoción por componente de la PTAR- Escenario 1. ....	90
Tabla 31: Resultados de simulación en el Influyente, para el esc. N°2. ....	92
Tabla 32: Resultados de simulación en el cárcamo de bombeo, para el esc. N°2. ....	93
Tabla 33: Resultados de la simulación en el desarenador para el esc. N°2. ....	94
Tabla 34: Resultados de simulación de la entrada a la zanja de ox. para el esc. N°2. ....	95
Tabla 35: Resultados de simulación de recirculación en la zanja de oxid.-esc.N°2. ....	96
Tabla 36: Resultados de simulación de la salida a la zanja de oxid.-escenario N°2.....	96
Tabla 37: Resultados de simulación en la entrada del clarif. sec. para esc. N°2. ....	102
Tabla 38: Resultados de simulación de sobrenadante del clarif. sec.-esc. N°2. ....	103
Tabla 39: Resultados de simulación de lodo sedimentado del clarif. sec. esc.N°2. ....	103
Tabla 40: Resultados de simulación del Q de lodo en el lecho de sec.1 esc. N°2. ....	107
Tabla 41: Resultados de simulación de lixiviados en el lecho de sec.1-esc. N°2. ....	108
Tabla 42: Resultados de simulación de lodo desh. en el lecho de sec. 1-esc. N°2. ....	108
Tabla 43: Resultados de simulación del Q de lodo en el lecho de sec.2-esc. N°2.....	112
Tabla 44: Resultados de simulación de lixiviados en el lecho de sec.2-esc. N°2. ....	113
Tabla 45: Resultados de simulación de lodo desh. en el lecho de sec.2-esc. N°2. ....	113
Tabla 46: Resultados de simulación a la entrada de la desinfección-esc. N°2. ....	116
Tabla 47: Resultados de simulación en la salida de la desinfección-esc. N°2.....	117
Tabla 48: Resultados de simulación del lodo deshidratado 1, para el esc. N°2.....	121
Tabla 49: Resultados de simulación del lodo deshidratado 2, para el esc. N°2.....	122
Tabla 50: Resultados de simulación en la descarga de la PTAR, para el esc. N°2. ....	123
Tabla 51: Eficiencia de remoción del escenario N°2.....	126
Tabla 52: Análisis de la variación de temperatura. ....	129



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Página.</b>
Figura 1:Esquema del tren de tratamiento PTAR “Viacha (La Paz)” .....	19
Figura 2:Esquema del tren de tratamiento PTAR “Viacha (La Paz)” .....	20
Figura 3:PTAR “Viacha (La Paz)” y sus componentes. ....	21
Figura 4: Partes de un medidor Parshall. ....	23
Figura 5: Componentes del pretratamiento de la PTAR "Viacha, (La Paz)" .....	24
Figura 6: Esquema funcional de lodos activados con zanja de oxidación. ....	25
Figura 7: Vista en planta- Zanja de oxidación en la PTAR. ....	25
Figura 8: Funcionamiento hidráulico de la zanja de oxidación. ....	26
Figura 9: funcionamiento hidráulico en corte de la zanja de oxidación. ....	26
Figura 10: Esquema de las capas en un tanque de sedimentación secundaria. ....	28
Figura 11: Esquema de un lecho de secado. ....	30
Figura 12: Esquema Referencial del proceso de retorno de lodos .....	32
Figura 13: Ventana del programa Gps-X para seleccionar la biblioteca de datos. ....	44
Figura 14: Tabla de procesos de los componentes de una PTAR. ....	45
Figura 15: Esquema del tren de trat. de la PTAR Viacha en software Gps-X.....	47
Figura 16: Ventana "Influent Advisor". ....	48
Figura 17: Esquema de funcionamiento de la zanja de ox. de la PTAR Viacha .....	49
Figura 18: Esquema de fracción de recirculación en la zanja de oxidación. ....	50
Figura 19: Esquema de fracción de influente en la zanja de oxidación. ....	50
Figura 20: Esquema de ubicación de los cepillos en la zanja de oxidación.....	50
Figura 21: Objeto "Afluente". ....	55
Figura 22: Objeto "Estación de bombeo" .....	56
Figura 23: Objeto "Desarenador". ....	57
Figura 24: Objeto "Zanja de oxidación". ....	58
Figura 25: Objeto "Clarificador secundario". ....	65
Figura 26: Objeto "Lecho de secado 1". ....	70
Figura 27: Objeto "Lecho de secado". ....	75
Figura 28: Objeto "Desinfección por cloro". ....	80

Figura 29: Objeto "Lodo deshidratado 1".	85
Figura 30: Objeto "Lodo deshidratado 2".	86
Figura 31: Objeto "Descarga".	87
Figura 32: Diagrama de masa- Escenario N° 1.	91
Figura 33: Objeto "Afluente".	92
Figura 34: Objeto "Estación de bombeo".	93
Figura 35: Objeto "Desarenador".	94
Figura 36: Objeto "Clarificador secundario".	102
Figura 37: Objeto "Lecho de secado 1".	107
Figura 38: Objeto "Lecho de secado".	112
Figura 39: Objeto "Desinfección por cloro".	116
Figura 40: Objeto "Lodo deshidratado 1".	121
Figura 41: Objeto "Lodo deshidratado 2".	122
Figura 42: Objeto "Descarga".	123
Figura 43: Diagrama de masa- Escenario N°2.	127

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

	<b>Página.</b>
Gráfico 1: Caudal - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	58
Gráfico 2: Sólidos suspendidos totales- Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	58
Gráfico 3: Sólidos suspendidos volátiles - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	59
Gráfico 4: DBO <sub>5</sub> - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	59
Gráfico 5: DQO - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	60
Gráfico 6: Amonio - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	60
Gráfico 7: Nitrógeno de Kjeldahl- Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	61
Gráfico 8: Alcalinidad - Tiempo, en la zanja de oxidación ....	61
Gráfico 9: Oxígeno disuelto - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	62
Gráfico 10: Relación F/M - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	62
Gráfico 11: Caudal - Tiempo, en el clarificador secundario. ....	65
Gráfico 12: Sólidos suspendidos totales-Tiempo, en el clarificador secundario. ....	65
Gráfico 13: Sólidos suspendidos volátiles - Tiempo, en el clarificador secundario. ....	66
Gráfico 14: DBO <sub>5</sub> - Tiempo, en el clarificador secundario. ....	66
Gráfico 15: Demanda química de oxígeno-Tiempo, en el clarificador secundario. ....	67
Gráfico 16: Nitrógeno total - Tiempo, en el clarificador secundario. ....	67
Gráfico 17: Flujo de lodo - Tiempo, en el lecho de secado 1. ....	70
Gráfico 18: Sólidos suspendidos totales - Tiempo, en el lecho de secado 1. ....	70
Gráfico 19: Sólidos suspendidos volátiles - Tiempo, en el lecho de secado 1. ....	71
Gráfico 20: DBO <sub>5</sub> - Tiempo, en el lecho de secado 1. ....	71
Gráfico 21: Nitrógeno total - Tiempo, en el lecho de secado 1. ....	72
Gráfico 22: DQO - Tiempo, en el lecho de secado 1 ....	72
Gráfico 23: Flujo de lodo – Tiempo, en el lecho de secado 2. ....	75
Gráfico 24: Sólidos suspendidos totales – Tiempo, en el lecho de secado 2. ....	75
Gráfico 25: Sólidos suspendidos volátiles–Tiempo, en el lecho de secado 2. ....	76
Gráfico 26: DBO <sub>5</sub> – Tiempo, en el lecho de secado 2. ....	76

Gráfico 27: DQO – Tiempo, en el lecho de secado 2. ....	77
Gráfico 28: Nitrógeno total – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	77
Gráfico 29: Caudal – Tiempo, en la unidad de desinfección. ....	80
Gráfico 30: Sólidos suspendidos totales–Tiempo, en la unidad de desinfección. ....	80
Gráfico 31: Sólidos suspendidos volátiles–Tiempo, en la unidad de desinfección. ....	81
Gráfico 32: DBO <sub>5</sub> – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	81
Gráfico 33: DQO – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	82
Gráfico 34: Nitrógeno total – Tiempo, en la unidad de desinfección. ....	82
Gráfico 35: Relación de caudal de entrada y salida de la PTAR. ....	86
Gráfico 36: Relación de SST a la entrada y salida de la PTAR. ....	86
Gráfico 37: Relación DBO <sub>5</sub> a la entrada y salida de la PTAR.....	87
Gráfico 38: Relación DQO a la entrada y salida de la PTAR.....	87
Gráfico 39: Caudal - Tiempo, en la zanja de oxidación.....	95
Gráfico 40: Sólidos suspendidos totales- Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	95
Gráfico 41: Sólidos suspendidos volátiles - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	96
Gráfico 42: DBO <sub>5</sub> - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	96
Gráfico 43: DQO - Tiempo, en la zanja de oxidación.....	97
Gráfico 44: Amonio - Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	97
Gráfico 45: Nitrógeno de Kjeldahl- Tiempo, en la zanja de oxidación. ....	98
Gráfico 46: Alcalinidad - Tiempo, en la zanja de oxidación ....	98
Gráfico 47: Oxígeno disuelto - Tiempo, en la zanja de oxidación.....	99
Gráfico 48: Relación F/M - Tiempo, en la zanja de oxidación.....	99
Gráfico 49: Caudal - Tiempo, en el clarificador secundario.....	102
Gráfico 50: Sólidos suspendidos totales - Tiempo, en el clarificador secundario. ....	102
Gráfico 51: Sólidos suspendidos v. - Tiempo, en el clarificador secundario.....	103
Gráfico 52: DBO <sub>5</sub> - Tiempo, en el clarificador secundario. ....	103
Gráfico 53: DQO - Tiempo, en el clarificador secundario.....	104
Gráfico 54: Nitrógeno total - Tiempo, en el clarificador secundario.....	104
Gráfico 55: Flujo de lodo - Tiempo, en el lecho de secado 1. ....	107

Gráfico 56: Sólidos suspendidos totales - Tiempo, en el lecho de secado 1.....	107
Gráfico 57: Sólidos suspendidos volátiles - Tiempo, en el lecho de secado 1.....	108
Gráfico 58: DBO <sub>5</sub> - Tiempo, en el lecho de secado 1.....	108
Gráfico 59: Nitrógeno total - Tiempo, en el lecho de secado 1.....	109
Gráfico 60: DQO - Tiempo, en el lecho de secado 1.....	109
Gráfico 61: Flujo de lodo – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	112
Gráfico 62: Sólidos suspendidos totales – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	112
Gráfico 63: Sólidos suspendidos volátiles – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	113
Gráfico 64: DBO <sub>5</sub> – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	113
Gráfico 65: DQO – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	114
Gráfico 66: Nitrógeno total – Tiempo, en el lecho de secado 2.....	114
Gráfico 67: Caudal – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	117
Gráfico 68: Sólidos suspendidos totales – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	117
Gráfico 69: Sólidos suspendidos v.– Tiempo, en la unidad de desinfección.....	118
Gráfico 70: DBO <sub>5</sub> – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	118
Gráfico 71: DQO – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	119
Gráfico 72: Nitrógeno total – Tiempo, en la unidad de desinfección.....	119
Gráfico 73: Relación caudal de entrada-salida de la PTAR del lodo deshidratado.....	123
Gráfico 74: Relación de SST de entrada y salida de la PTAR.....	123
Gráfico 75: Relación DBO <sub>5</sub> de entrada y salida de la PTAR.....	124
Gráfico 76: Relación DQO de entrada y salida de la PTAR.....	124