

## ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	I
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	IX
Resumen	XI
Introducción	1
Objetivo	1
1. Fundamentos	2
1.1. Agua residual	2
1.1.1. Historia breve de las aguas residuales	2
1.1.2. El agua alrededor del mundo	3
1.1.3. Contaminación de agua a nivel mundial	4
1.1.4. Contaminación del agua en México	4
1.1.5. Tratamiento de aguas residuales en México y en el mundo	6
1.2. Clasificación de las aguas residuales	8
1.3. Caracterización de las aguas residuales	8
1.3.1. Características físicas	9
1.3.1.1. Sólidos totales	9
1.3.1.2. Olor	9
1.3.1.3. Color	10
1.3.1.4. Temperatura	10
1.3.2. Características químicas orgánicas	10
1.3.2.1. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	11
1.3.2.2. Demanda química de oxígeno (DQO)	12
1.3.3. Características químicas inorgánicas	13
1.3.4. Características biológicas	13
1.4. Tratamiento	13
1.4.1. Niveles de tratamiento	15
1.4.2. Pre-tratamiento y tratamiento primario	15
1.4.2.1. Desbaste	15
1.4.2.2. Dilaceración	16
1.4.2.3. Remoción de arena	16
1.4.2.4. Tanques de homogeneización de caudales	17
1.4.2.5. Mezclado	18

1.4.2.6. Floculación _____	18
1.4.2.7. Sedimentación _____	18
1.4.2.8. Flotación _____	19
1.4.2.9. Filtración _____	20
1.4.3. Tratamiento secundario _____	20
1.4.3.1. Procesos de tratamiento aerobio _____	22
1.4.3.1.1. Procesos aerobios de cultivo en suspensión _____	23
1.4.3.1.1.1. Proceso de lodos activados _____	23
1.4.3.1.1.2. Reactor secuencial Batch (RSB) _____	25
1.4.3.1.1.3. Estanques y lagunas _____	27
1.4.3.1.2. Procesos de tratamiento aerobio de cultivos fijos _____	28
1.4.3.1.2.1. Filtros percoladores _____	28
1.4.3.1.2.2. Reactor de discos biológicos (RDB) _____	29
1.4.3.1.2.3. Reactor biológico de membrana (RBM) _____	30
1.4.3.1.2.4. Reactor biológico de lecho móvil (RBLM) _____	31
1.4.3.2. Procesos de tratamiento anaerobio _____	34
1.4.3.2.1. Procesos de tratamiento anaerobio de cultivos en suspensión _____	36
1.4.3.2.1.1. Proceso de contacto anaerobio _____	36
1.4.3.2.1.2. Reactor secuencial Batch anaerobio _____	36
1.4.3.2.2. Proceso anaerobio de lecho de lodos _____	37
1.4.3.2.2.1. Reactor de lecho de lodos y flujo ascendente (RALLFA) _____	37
1.4.4. Tratamiento avanzado _____	38
1.4.4.1. Procesos avanzados de filtración _____	39
1.4.4.1.1. Filtración por membrana _____	39
1.4.5. Desinfección _____	40
1.4.5.1.1. Cloro _____	40
1.4.5.1.2. Luz ultravioleta (UV) _____	41
1.4.5.1.3. Ozono _____	42
1.4.5.1.4. Dióxido de cloro _____	42
1.5. Sostenibilidad en el tratamiento de aguas residuales _____	43
2. Metodología _____	46
2.1. Caso de estudio _____	46
2.1.1. Diseño original _____	47
2.1.1.1. Pre-tratamiento y tratamiento primario _____	48
2.1.1.1.1. Colectores _____	48
2.1.1.1.2. Rejillas _____	48

2.1.1.1.3.	Cárcamo de bombeo _____	48
2.1.1.1.4.	Desarenador _____	48
2.1.1.2.	Tratamiento secundario _____	48
2.1.1.2.1.	Reactores biológicos _____	48
2.1.1.2.2.	Sedimentación secundaria _____	49
2.1.1.3.	Tratamiento avanzado _____	49
2.1.1.3.1.	Filtración _____	49
2.1.1.4.	Desinfección _____	49
2.1.2.	Situación actual _____	49
2.2.	Justificación de la propuesta para aumentar la capacidad de la PTARCU _____	51
2.3.	Ingeniería básica de la propuesta para aumentar la capacidad de la PTARCU _____	51
2.3.1.	Primera comparación de sistemas de tratamiento biológico _____	52
2.3.2.	Área disponible para la propuesta _____	54
2.3.3.	Población de diseño _____	55
2.3.3.1.	Población de Ciudad Universitaria _____	55
2.3.3.2.	Población Copilco el Alto _____	57
2.3.3.3.	Cálculo de la población de diseño _____	57
2.3.4.	Gasto de diseño _____	57
2.3.5.	Caracterización del agua residual _____	58
2.3.5.1.	Aforo _____	59
2.3.5.1.1.	Calibración del medidor de flujo _____	60
2.3.5.1.2.	Procedimiento de aforo _____	61
2.3.5.2.	Muestreo _____	64
2.3.6.	Tanque de igualación _____	66
2.3.7.	Pre-tratamiento y tratamiento primario _____	69
2.3.7.1.	Rejillas _____	69
2.3.7.2.	Desarenador _____	69
2.3.7.3.	Sedimentación primaria _____	71
2.3.8.	Tratamiento secundario _____	71
2.3.8.1.	RBLM con lodos activados de mezcla completa _____	71
2.3.8.1.1.	Procedimiento de diseño del reactor RBLM _____	73
2.3.8.1.2.	Procedimiento de diseño del reactor de lodos activados mezcla completa _____	78
2.3.8.1.3.	Procedimiento de diseño del sedimentador secundario _____	84
2.3.8.1.4.	Resumen del reactor RBLM con lodos activados de mezcla completa y sedimentación secundaria. _____	86
2.3.8.2.	Reactor secuencial Batch (RSB) _____	86

2.3.8.2.1.	Procedimiento de diseño del reactor RSB _____	87
2.3.8.2.2.	Resumen de diseño del RSB _____	96
2.3.9.	Tratamiento avanzado _____	97
2.3.10.	Desinfección _____	99
3.	Resultados _____	102
3.1.	Comparación final y selección de la propuesta _____	102
3.2.	Análisis de resultados _____	104
3.3.	Factibilidad Ambiental _____	105
3.4.	Factibilidad técnica _____	106
3.4.1.	Dimensionamiento _____	106
3.4.1.1.	Dimensionamiento del tanque de igualación _____	106
3.4.1.2.	Dimensionamiento del reactor RBLM _____	108
3.4.1.3.	Dimensionamiento del reactor de lodos activados de mezcla completa _____	109
3.4.1.4.	Dimensionamiento del sedimentador secundario _____	110
3.4.1.5.	Resumen del dimensionamiento _____	112
3.4.1.6.	Ubicación del sistema de tratamiento en el espacio disponible de la PTARCU _	112
3.4.2.	Balance de masa del tren de tratamiento _____	112
3.4.3.	Perfil hidráulico de la propuesta _____	113
3.4.3.1.	Análisis por bombeo tramo 1-2 _____	115
3.4.3.2.	Análisis por bombeo tramo 2-3 _____	118
3.5.	Factibilidad económica _____	119
3.5.1.	Costos de inversión _____	120
3.5.2.	Costos de operación anual por consumo energético _____	122
3.5.3.	Valor presente neto de la propuesta _____	122
4.	Conclusiones e investigaciones futuras _____	124
4.1.	Conclusiones _____	124
4.2.	Investigaciones futuras _____	125
	Referencias _____	126
	Glosario _____	132

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1	Porcentajes de agua mundial _____	4
Fig. 1.2	Calidad Superficial del agua, conforme a la DBO <sub>5</sub> en mg/l _____	5
Fig. 1.3	Calidad Superficial del agua, conforme a la DQO en mg/l _____	5
Fig. 1.4	Calidad Superficial del agua, conforme a los SST en mg/l _____	5
Fig. 1.5	Registro anual de la generación de aguas residuales en México _____	6
Fig. 1.6	Porcentaje medio de aguas tratadas efectivamente _____	7
Fig. 1.7	Generación, colección y tratamiento de las aguas residuales en México en el año 2007 _____	7
Fig. 1.8	Meta de cobertura de tratamiento para el año 2012 _____	7
Fig. 1.9	Comportamiento de la DBO con respecto al tiempo _____	11
Fig. 1.10	Crecimiento de biomasa y consumo de sustrato _____	21
Fig. 1.11	Lodos activados completamente mezclado _____	24
Fig. 1.12	Lodos activados en flujo pistón _____	24
Fig. 1.13	Etapas del reactor RSB _____	27
Fig. 1.14	Ejemplo de distintos tipos de soporte de película biológica en el RBLM _____	33
Fig. 1.15	Proceso de tratamiento con RBLM _____	33
Fig. 1.16	Proceso de contacto anaerobio _____	36
Fig. 1.17	Reactor secuencial Batch anaerobio _____	37
Fig. 2.1	Localización de la PTARCU en Ciudad Universitaria _____	46
Fig. 2.2	Acercamiento de la PTARCU _____	46
Fig. 2.3	Diagrama de flujo original _____	47
Fig. 2.4	Diagrama de flujo después de la primera remodelación de la PTARCU _____	50
Fig. 2.5	Diagrama con la propuesta para aumentar la capacidad de la PTARCU _____	52
Fig. 2.6	Comparación unitaria de tratamientos secundarios _____	53
Fig. 2.7	Área disponible para la propuesta de ampliación de la PTARCU _____	54
Fig. 2.8	Colectores de agua residual de la PTARCU _____	59
Fig. 2.9	Equipo medidor de velocidad de flujo a superficie libre _____	60
Fig. 2.10	Equipo realizando una medición de flujo a superficie libre _____	60
Fig. 2.11	Hidrograma del día 1, del día 2 e hidrograma promedio _____	63
Fig. 2.12	Comparación entre un arreglo común de procesos y operaciones unitarias y el requerido en la PTARCU _____	67
Fig. 2.13	Hidrograma representativo del influente de la PTARCU en porcentajes de entrada para diseño del tanque de igualación _____	67
Fig. 2.14	Hidrograma de diseño para el tanque de igualación _____	68
Fig. 2.15	Curva masa de los gastos de entrada y gasto de salida constante _____	68

Fig. 2.16	Desarenador tipo vortex de Huber, COANDA Complete Plant R0 5C _____	70
Fig. 2.17	Diagrama de flujo de la propuesta con RBLM+LA de tratamiento secundario. _____	73
Fig. 2.18	Diagrama de flujo de la propuesta con RSB de tratamiento secundario _____	87
Fig. 2.19	Comparación de consumo energético unitario entre la ultrafiltración y la microfiltración _____	97
Fig. 2.20	Sistema de microfiltración SIEMENS EFC-10800 _____	98
Fig. 3.1	Comparación unitaria entre RBLM con Lodos Activados y RSB _____	103
Fig. 3.2	Diagrama de flujo de la propuesta final para aumentar la capacidad de la PTARCU _____	103
Fig. 3.3	Desarrollo de la DBO, SST y del consumo energético a través del proceso de tratamiento _____	104
Fig. 3.4	Consumo energético de la Línea 1 y de la Línea 2 _____	105
Fig. 3.5	Tanque de igualación-Planta _____	106
Fig. 3.6	Tanque de igualación-Corte A-A _____	107
Fig. 3.7	Tanque de igualación-Corte B-B _____	107
Fig. 3.8	Tanque de aireación de RBLM-Planta _____	108
Fig. 3.9	Tanque de aireación de RBLM-Corte A-A _____	108
Fig. 3.10	Tanque de aireación de RBLM -Corte B-B _____	109
Fig. 3.11	Tanque de aireación de lodos activados -Planta _____	109
Fig. 3.12	Tanque de aireación de lodos activados -Corte A-A _____	110
Fig. 3.13	Tanque de aireación de lodos activados-Corte B-B _____	110
Fig. 3.14	Sedimentador secundario. Planta _____	111
Fig. 3.15	Sedimentador secundario-Corte A-A _____	111
Fig. 3.16	Sedimentador secundario. Corte B-B _____	111
Fig. 3.17	Distribución de los procesos y operaciones unitarios de la propuesta. _____	112
Fig. 3.18	Balace de masas de la propuesta _____	113
Fig. 3.19	Elevación de las operaciones y procesos unitarias, sin excavación _____	113
Fig. 3.20	Perfil Hidráulico de la propuesta. _____	114

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1	Clasificación de las aguas residuales por su procedencia _____	8
Tabla 1.2	Clasificación del drenaje _____	8
Tabla 1.3	Resumen de la clasificación de los sólidos totales _____	9
Tabla 1.4	Clasificación de los sólidos volátiles y fijos _____	9
Tabla 1.5	Parámetros para la determinación de materia inorgánica _____	14
Tabla 1.6	Características biológicas de las aguas residuales _____	14
Tabla 1.7	Límites máximos permisibles de contaminantes _____	15
Tabla 1.8	Niveles de tratamiento _____	16
Tabla 1.9	Sistemas de remoción de arenas _____	17
Tabla 1.10	Tipos de sedimentación que se presentan en el tratamiento de aguas residuales _____	19
Tabla 1.11	Ventajas y desventajas del proceso de tratamiento aerobio _____	22
Tabla 1.12	Variaciones del sistema de lodos activados _____	25
Tabla 1.13	Ventajas y desventajas del sistema RSB _____	26
Tabla 1.14	Clasificación de estanques y lagunas _____	27
Tabla 1.15	Ventajas y desventajas del tratamiento por medio de filtros percoladores _____	29
Tabla 1.16	Ventajas y desventajas de los discos biológicos _____	30
Tabla 1.17	Ventajas y desventajas los reactores biológico de membrana (RBM) _____	32
Tabla 1.18	Ventajas y desventajas los RBLM _____	34
Tabla 1.19	Ventajas y desventajas del proceso de tratamiento anaerobio _____	35
Tabla 1.20	Ventajas y desventajas de un sistema RALLFA _____	38
Tabla 1.21	Aplicación de las tecnologías de filtración por membrana _____	39
Tabla 1.22	Ventajas y desventajas de la cloración _____	41
Tabla 1.23	Ventajas y desventajas de la UV _____	41
Tabla 1.24	Ventajas y desventajas de la ozono _____	42
Tabla 1.25	Ventajas y desventajas del dióxido de cloro _____	43
Tabla 1.26	Criterios para el diseño de un tratamiento sostenible de aguas residuales _____	44
Tabla 2.1	Resumen poblaciones por facultad para licenciatura _____	55
Tabla 2.2	Resumen poblaciones por facultad para maestría y doctorado _____	56
Tabla 2.3	Resumen poblaciones por facultad para especializaciones _____	56
Tabla 2.4	Población de Ciudad Universitaria que aporta a la PTARCU y la tasa de crecimiento _____	56
Tabla 2.5	Proyección de la población de diseño _____	57
Tabla 2.6	Aportación de agua residual por habitante al día dependiendo la actividad económico realizada _____	58
Tabla 2.7	Gastos de diseño por población y gasto de diseño final _____	58
Tabla 2.8	Resumen de Calibración del equipo de medición de velocidad de flujo _____	61
Tabla 2.9	Relación de volúmenes para muestra compuesta, día 1 _____	65
Tabla 2.10	Relación de volúmenes para muestra compuesta, día 2 _____	65

Tabla 2.11 Resultados de las muestras compuestas _____	65
Tabla 2.12 Promedio ponderado de parámetros en función del gasto en cada colector, día 1 _____	66
Tabla 2.13 Promedio ponderado de parámetros en función del gasto en cada colector, día 2 _____	66
Tabla 2.14 Comparación de los parámetros en el influente de la PTARCU con la composición típica de contaminantes en aguas residuales no tratadas _____	66
Tabla 2.15 Características después del tanque de igualación (influyente al reactor RBLM) _____	72
Tabla 2.16 Criterio de carga de diseño de DBO típico _____	73
Tabla 2.17 Resumen de las concentraciones a la entrada y a la salida del reactor RBLM _____	78
Tabla 2.18 Características del influente al reactor de lodos activados _____	78
Tabla 2.19 Condiciones y parámetros propuestos para el diseño de un reactor de lodos activados _____	79
Tabla 2.20 Parámetros definidos para la determinación de TRS _____	80
Tabla 2.21 Parámetros de comparación del reactor RBLM con lodos activados de mezcla completa y sedimentación secundaria convencional. _____	86
Tabla 2.22 Características después del tanque de igualación (influyente al reactor RSB) _____	87
Tabla 2.23 Condiciones y parámetros propuestos para el diseño de un reactor RSB. _____	88
Tabla 2.24 Tiempos de ciclo para el diseño del RSB _____	89
Tabla 2.25 Parámetros definidos para la determinación de TRS _____	92
Tabla 2.26 Parámetros de comparación del reactor RBLM con lodos activados y sedimentación secundaria convencional. _____	96
Tabla 2.27 Parámetros para la determinación de la dosis de cloro requerida _____	99
Tabla 3.1 Comparación final entre RBLM con lodos activados y RSB _____	102
Tabla 3.2 Efluente de la Línea 1, Línea 2 y efluente final _____	103
Tabla 3.3 Resumen del dimensionamiento del tren de tratamiento _____	112
Tabla 3.4 Consumo energético por hora, del tramo 1-2 _____	118
Tabla 3.5 Resumen del volumen de excavación en roca, demolición y construcción de elementos de concreto armado _____	120
Tabla 3.6 Costos de inversión en pesos _____	121
Tabla 3.7 Costos de operación anual por consumo energético más representativos de la propuesta, en pesos 122	
Tabla 3.8 Valor presente neto de la propuesta, en pesos _____	122