

UNIVERSIDAD NACIONAL
“Campus Omar Dengo”
SISTEMAS DE ESTUDIOS DE POSGRADO
ESCUELA DE QUÍMICA

MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ÉNFASIS EN GESTIÓN Y ESTUDIOS
AMBIENTALES

Dimensionamiento del tratamiento secundario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Los Tajos mediante las tecnologías de Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membranas (MBR) para su comparación con el prediseño existente de Lodos Activados Convencionales (LAC)

ING. RAILLY MARÍA SOLANO RAMÍREZ

Tutor: Ing. Álvaro Araya García, MSc.
Asesor: Ing. Erick Mata Abdelnour, PhD.
Asesor: Q. Roy Pérez Salazar, MSc.

Heredia

Mayo, 2018



Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Centro de Documentación e Información
UEN Investigación y Desarrollo

BOLETA DE AUTORIZACIÓN DEL AUTOR PARA PUBLICAR INFORMACIÓN

Yo, Railly Solano Ramírez

N° Cédula 1-1249-0153

Dependencia: UEN de Programación y Control, Dirección de Diseño de Saneamiento

Autorizo al Centro de Documentación e Información para incluir y publicar en el sitio Web y la intranet del AyA la siguiente información:

Autor(es): Ing. Railly Solano Ramírez

Título: Dimensionamiento del tratamiento secundario de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Los Tajos mediante las tecnologías de Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membranas (MBR) para su comparación con el prediseño existente de Lodos Activados Convencionales (LAC)

(Tesis para optar al grado de Maestría en Ciencias con énfasis en Gestión y Estudios Ambientales, Escuela de Química, UNA)

E-mail: rsolano@aya.go.cr

N° Teléfono: 8913-9016

Firma: _____

Tesis presentada y aprobada para optar al grado de Magíster en Ciencias, con énfasis en Gestión y Estudios Ambientales.

Cumple con los requisitos establecidos por el Sistema de Estudios de Posgrado de la Universidad Nacional, Heredia, Costa Rica.

Miembros del Tribunal Examinador

	<u>NOMBRE</u>	<u>FIRMA</u>
Representante del Consejo Central de Posgrado	Dr. Francisco San Lee Campos	_____
Representante del Programa de Posgrado	Dr. Gilberto Piedra Marín	_____
Tutor	MSc. Álvaro Araya García	_____
Asesor	MSc. Roy Pérez Salazar	_____
Lector	MSc. Carolina Alfaro Chinchilla	_____
Sustentante	Ing. Raily Solano Ramírez	_____

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar la mejor tecnología de tratamiento secundario a implementar en la PTAR Los Tajos, para la etapa intermedia y etapa II, a partir de un análisis multicriterio (AMC) de tres tecnologías: Lodos Activados Convencionales (LAC), Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membrana (MBR). Con la colaboración de empresas consultoras y literatura consultada, se realizaron los prediseños mediante IFAS y MBR, y se analizó el prediseño y el presupuesto existente de LAC, propuesto por Acciona Agua S.A.U. (como parte de la licitación de la etapa I). A partir de los tres prediseños se determinan: áreas de terreno requeridas, consumos energéticos, calidad esperada del efluente y otros aspectos operativos. De las tres tecnologías, la de LAC es la menos compacta (6,12 ha de terreno), el consumo energético es el menor (30,91 GWh/año), la calidad del efluente cumple con lo solicitado y para este sistema se cuenta con experiencia institucional. Los IFAS resultan con un área de terreno intermedia (3,98 ha), regular consumo energético (46,36 GWh/año), experiencia satisfactoria en la PTAR El Roble de Puntarenas (operada por el AyA), y la calidad del efluente es levemente mejor que lo solicitado. La tecnología MBR resulta ser la más compacta (3,05 ha) y de una excelente calidad del efluente; sin embargo, es la de mayor consumo energético (57,42 GWh/año), mayores dificultades operativas y ninguna experiencia institucional. Se cotizaron las obras civiles, equipamiento e insumos necesarios para los prediseños de IFAS y MBR y, utilizando porcentajes de la literatura para los rubros no presupuestados, se obtuvieron costos de inversión, operación, mantenimiento y el pago por el canon ambiental por vertidos. Se aplicó el método de Valor Actual de Costos (VAC) para el análisis financiero, resultando LAC como la más rentable (-US\$124,14 millones), seguida de IFAS (-US\$152,92 millones) y la menos rentable MBR (-US\$231,18 millones). Se analizó la posibilidad de reúso de las aguas tratadas, siendo más factible para MBR. Se establecieron los criterios técnicos, económicos, ambientales y sociales a evaluar en el AMC. A partir de los resultados obtenidos para cada prediseño, se asignan valores a cada criterio y finalmente se ponderan, resultando que la mejor tecnología a implementar es LAC (66%), seguida de IFAS (65%) y MBR (54%). Se recomienda realizar un estudio adicional, donde se implemente la tecnología de LAC en la etapa intermedia, modificándose a IFAS en la etapa II, considerándose desde el inicio el cambio de tecnología.

DEDICATORIA

Esta investigación se la dedico a mi familia por todo su apoyo, especialmente a mi esposo, a papi, a mami y a Auxi. Y en la memoria de abuelita Lala, que me heredó tanta fuerza y valentía para alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero a Dios, por guiarme en la toma de decisiones. Segundo, a todas las personas que de una u otra forma me brindaron su colaboración y apoyo para la realización de esta investigación. Gracias a Gustavo por ser mi motivador principal.

Gracias al Ing. Álvaro Araya por su guía y apoyo, al Ing. Erick Mata por compartirme sus conocimientos y al profesor Roy por sus recomendaciones.

Especial agradecimiento al Ing. Andrés Lazo por toda la ayuda que me brindó a lo largo de todo el proceso, al Ing. Olman Jiménez, a don Manuel López, al Ing. Freddy Payne, al Ing. Rodolfo González, Ing. Martín Fonseca, a Juan Diego Quirós y Norman Aguilar, a Erick Centeno, Ilena Vega y todos aquellos funcionarios de la PTAR Los Tajos y de la antigua UE AyA-JBIC que me brindaron información necesaria para mi proyecto.

Gracias a la empresa *Headworks Bio Inc.*, especialmente al Ing. Siva Angappan y a la empresa *Evoqua Water Technologies*, por los aportes tan valiosos para esta investigación. Le agradezco a Priscilla Carbonell y a todas las amistades que estuvieron acompañándome en este proceso.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE CUADROS.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xviii
LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS.....	xix

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes	1
1.2. Justificación	5

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. El tratamiento de las aguas residuales	10
2.1.1. Definición de aguas residuales.....	10
2.1.2. Procesos de tratamiento de las aguas residuales	11
2.1.3. Procesos de tratamiento de los lodos residuales de PTARs	13
2.1.4. Procesos de tratamiento de los olores en PTARs	14
2.2. Lodos Activados Convencionales (LAC)	15
2.2.1 Componentes y funcionamiento del sistema LAC	15
2.2.2 Parámetros de diseño de la tecnología de LAC.....	16
2.2.3 Eficiencia en la remoción de contaminantes de la tecnología LAC.....	17
2.3. Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS).....	18
2.3.1. Componentes y funcionamiento de la tecnología IFAS	18
2.3.2. Configuraciones de los sistemas IFAS	19
2.3.3. Tipos de medios soportantes (biosoportos)	21
2.3.4. Consideraciones del diseño y recomendaciones operativas de la tecnología IFAS	24
2.4. Biorreactores de Membrana (MBR)	26
2.4.1. Componentes y funcionamiento del sistema MBR	26
2.4.2. Configuraciones de los sistemas MBR.....	29
2.4.3. Material de las membranas para MBR.....	31
2.4.4. Tipo de membranas para la tecnología MBR	32
2.4.5. Parámetros de diseño de la tecnología MBR	35
2.4.6. Eficiencia en la remoción de contaminantes de la tecnología MBR.....	38
2.4.7. Producción y manejo de lodos en la tecnología de MBR	39

2.4.8. Requerimientos técnicos específicos para la tecnología MBR	39
2.4.8.1. Pretratamiento del afluente	39
2.4.8.2. Requerimientos de oxígeno en el sistema	41
2.4.8.3. Ensuciamiento y mantenimiento de las membranas	42
2.4.8.4. Capacitación y asistencia de los operadores	46
2.4.8.5. Consumo energético.....	46
2.4.8.6. Vida útil de las membranas	47
2.4.8.7. Puesta en marcha del sistema MBR.....	47
2.5. Reúso o recuperación de las aguas residuales	48
2.6. Metodología de análisis multicriterio para la toma de decisiones	51
2.6.1. Introducción al análisis multicriterio.....	51
2.6.2. Selección de criterios para la evaluación	51

CAPÍTULO III. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA **53**

3.1. Objetivo General.....	53
3.2. Objetivos Específicos	53
3.3. Metodología.....	53
3.3.1. Búsqueda de referencias y análisis de la información.....	53
3.3.2. Prediseños de las tecnologías LAC, IFAS y MBR.....	55
3.3.3. Estimación de costos y análisis financiero	57
3.3.4. Análisis Multicriterio (AMC).....	60

CAPÍTULO IV. PTAR LOS TAJOS **62**

4.1. Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José (PMAAMSJ).....	62
4.1.1. Descripción del PMAAMSJ.....	62
4.1.2. Beneficiarios del PMAAMSJ.....	64
4.2. Ubicación y características de la PTAR Los Tajos	65
4.2.1. Ubicación de la PTAR.....	65
4.2.2. Características climáticas del sitio Los Tajos.....	68
4.3. Diseño y construcción de la PTAR Los Tajos	69
4.3.1. Producción de agua residual.....	69
4.3.2. Características físico-químicas del afluente	69
4.3.3. Calidad físico-química del efluente para cada etapa de la PTAR Los Tajos...	70
4.3.4. Adjudicación del proyecto	71
4.3.5. Unidades de tratamiento de la etapa I de la PTAR.....	72
4.3.6. Unidades de tratamiento de la etapa intermedia y etapa II de la PTAR.....	75
4.3.6.1. Estudios de diferentes sistemas para el tratamiento secundario de la PTAR.....	75
4.3.6.2. Aspectos del tratamiento secundario incluidos en la licitación de la etapa I.....	77

CAPÍTULO V. DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO MEDIANTE LAS TECNOLOGÍAS LAC, IFAS Y MBR **79**

5.1. Aspectos importantes a considerar en los prediseños del tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos	79
--	----

5.1.1. Parámetros de calidad del agua cruda y caudal del afluente	79
5.1.2. Calidad fisico-química del efluente solicitada	79
5.1.3. Terreno disponible para la construcción de las unidades de tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos	79
5.2. Dimensionamiento del tratamiento secundario prediseñado: sistema de Lodos Activados Convencionales (LAC).....	80
5.2.1. Introducción al prediseño de la tecnología de LAC	80
5.2.2. Descripción del prediseño de la tecnología LAC realizado por Acciona Agua S.A.U.	80
5.2.3. Análisis del prediseño de LAC realizado por Acciona Agua S.A.U. y comparación con otras metodologías de diseño.....	82
5.2.3.1. Prediseño del reactor biológico.....	82
5.2.3.2. Dimensionamiento de los sopladores.....	86
5.2.3.3. Prediseño de los sedimentadores secundarios.....	87
5.2.3.4. Producción de lodos	89
5.3. Prediseño mediante la tecnología de Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) para la PTAR Los Tajos	89
5.3.1. Implementación de la tecnología IFAS para la PTAR El Roble, Puntarenas..	89
5.3.2. Introducción al prediseño de la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos	94
5.3.3. Prediseño mediante la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos	94
5.3.3.1. Parámetros de diseño para la tecnología de IFAS	95
5.3.3.2. Prediseño de los biorreactores IFAS y LAC	99
5.3.3.3. Prediseño de los sedimentadores secundarios.....	108
5.3.3.4. Producción de lodos	110
5.3.4. Resumen del prediseño mediante la tecnología IFAS.....	110
5.4. Prediseño mediante la tecnología de Biorreactores de Membrana (MBR) para la PTAR Los Tajos.....	113
5.4.1. Introducción al prediseño de la tecnología MBR.....	113
5.4.2. Configuración del sistema y tipo membrana seleccionados.....	113
5.4.3. Prediseño biológico para la tecnología de MBR.....	114
5.4.3.1. Cálculos de parámetros biológicos para la zona aeróbica.....	115
5.4.3.2. Cálculos de parámetros biológicos para la zona anóxica.....	120
5.4.3.3. Producción de lodos etapa biológica.....	122
5.4.3.4. Resumen del prediseño biológico para el proceso completo	122
5.4.4. Prediseño del sistema de membranas para la tecnología MBR.....	123
5.4.4.1. Dimensionamiento del tanque de membranas.....	123
5.4.4.2. Sistema de aireación de los tanques de membranas.....	125
5.4.5. Resumen del prediseño mediante la tecnología MBR	127
5.5. Área de terreno requerida para los prediseños del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos.....	132
5.5.1. Área de terreno para el prediseño existente mediante la tecnología de LAC	132
5.5.2. Área de terreno para el prediseño mediante la tecnología de IFAS	133
5.5.3. Área de terreno para el prediseño mediante la tecnología de MBR.....	133
5.5.4. Comparación de áreas de terreno de las tres tecnologías analizadas	134
5.6. Calidad esperada del efluente para cada tecnología prediseñada	135

5.6.1. Calidad esperada del efluente de la tecnología LAC	135
5.6.2. Calidad esperada del efluente de la tecnología IFAS	136
5.6.3. Calidad esperada del efluente de la tecnología MBR	137
5.6.4. Comparación de la calidad del efluente esperada	137
5.7. Consumo energético para cada tecnología prediseñada	138
5.7.1. Consumo energético para la tecnología LAC.....	138
5.7.2. Consumo energético de la tecnología IFAS	139
5.7.2.1. Caso de la PTAR El Roble	139
5.7.2.2. Caso de la PTAR Los Tajos.....	140
5.7.3. Consumo energético de la tecnología MBR.....	142
5.7.4. Comparación del consumo energético de las tres tecnologías analizadas.....	143

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS FINANCIERO

146

6.1. Costos asociados a la adquisición de terreno para las tecnologías LAC, IFAS Y MBR	146
6.2. Costos de inversión para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante las tecnologías LAC, IFAS y MBR.....	147
6.2.1. Aspectos importantes a considerar para la estimación de costos de inversión	147
6.2.1.1. Rubros de los costos de inversión	147
6.2.1.2. Costos asociados con la construcción de las obras complementarias	148
6.2.2. Costos de inversión estimados en la propuesta de LAC	148
6.2.2.1. Costos del control automatizado	150
6.2.2.2. Costos estimados tratamiento biológico.....	151
6.2.3. Costos de inversión estimados para el prediseño de la tecnología IFAS	153
6.2.3.1. Diseño, biosoportos y sistema de aireación para los reactores IFAS (paquete IFAS)	153
6.2.3.2. Obra Civil.....	154
6.2.3.3. Equipamiento	155
6.2.3.4. Control automatizado	157
6.2.3.5. Desglose de costos de inversión de la implementación de la tecnología IFAS	158
6.2.4. Costos de inversión estimados para el prediseño de la tecnología MBR.....	159
6.2.4.1. Diseño y sistema MBR (paquete de membranas)	159
6.2.4.2. Obra Civil.....	160
6.2.4.3. Equipamiento	161
6.2.4.4. Control automatizado	162
6.2.4.5. Desglose de costos de inversión de la implementación de la tecnología MBR	162
6.2.5. Resumen de los costos de inversión de todas las tecnologías estudiadas	163
6.3. Costos de Operación y Mantenimiento (O&M) de las tecnologías LAC, IFAS y MBR	164
6.3.1. Aspectos importantes a considerar para la estimación de costos de O&M... 164	
6.3.1.1. Costos por consumo de energía.....	164
6.3.1.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)	164

6.3.1.3. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento	165
6.3.1.4. Costos de las sustancias químicas requeridas	165
6.3.1.5. Costos por tratamiento y disposición de lodos.....	166
6.3.1.6. Costos por canon ambiental	166
6.3.2. Costos de O&M estimados para la tecnología LAC	166
6.3.2.1. Costos por consumo energético de la tecnología LAC	166
6.3.2.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)	167
6.3.2.3. Costos de las sustancias químicas requeridas	168
6.3.2.4. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento	168
6.3.2.5. Resumen de los costos de O&M para la tecnología de LAC	168
6.3.3. Costos de O&M estimados para la tecnología IFAS.....	170
6.3.3.1. Costos por consumo de energía.....	170
6.3.3.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)	170
6.3.3.3. Costos de las sustancias químicas requeridas	171
6.3.3.4. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento	171
6.3.3.5. Costos del reemplazo de los biosoportos	172
6.3.3.6. Resumen de los costos de O&M para la tecnología IFAS	173
6.3.4. Costos de O&M estimados para la tecnología MBR	174
3.4.1. Costos por consumo de energía	174
3.4.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)	174
3.4.3. Costos de las sustancias químicas requeridas	175
3.4.4. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento.....	176
3.4.5. Costo por reemplazo de las membranas.....	177
3.4.6. Resumen de costos de O&M para la tecnología MBR	177
6.3.5. Comparación de los costos de Operación y Mantenimiento (O&M) de las tecnologías estudiadas LAC, IFAS y MBR.....	179
3.5.1. Costos por consumo de energía	179
3.5.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)	179
3.5.3. Costos de las sustancias químicas requeridas	179
3.5.4. Costos del mantenimiento del equipo	180
3.5.5. Costo por reemplazo de insumos específicos (biosoportos y membranas).	180
6.4. Canon ambiental por vertido	181
6.5. Análisis financiero de las tecnologías LAC, IFAS y MBR	183
6.5.1. Método de análisis financiero: Valor Actual de Costos (VAC)	183
6.5.2. Aspectos importantes para la aplicación del VAC	184
6.5.3. Resultados del VAC.....	187

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS MULTICRITERIO (AMC) 195

7.1. Criterios a considerar en el análisis multicriterio	195
7.2. Asignación de valores para la ponderación de criterios	196
7.3. Descripción de los criterios de evaluación	197

7.3.1. Criterios técnicos.....	197
7.3.1.1. Área de terreno.....	197
7.3.1.2. Facilidades operativas.....	198
7.3.1.3. Experiencia institucional.....	198
7.3.1.4. Sensibilidad a picos de caudal o concentración.....	199
7.3.2. Criterio económico-financiero.....	200
7.3.2.1. Valor Actual de Costos (VAC).....	200
7.3.3. Criterios ambientales.....	200
7.3.3.1. Consumo energético.....	200
7.3.3.2. Calidad del efluente.....	201
7.3.3.3. Producción de lodos.....	202
7.3.4. Criterios sociales.....	203
7.3.4.1. Posibilidad de reúso (regeneración).....	203
7.4. Resultados del análisis multicriterio.....	206
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	208
8.1. Conclusiones.....	208
8.2. Recomendaciones.....	209
REFERENCIAS	212
ANEXOS	227
Anexos A: Cotizaciones de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS).....	227
Anexo A-1: Cotización del paquete de la tecnología IFAS.....	228
Anexo A-2: Cotizaciones de los sopladores.....	233
Anexo A-3: Cotizaciones de las bombas.....	246
Anexo A-4: Cotización e información técnica de los difusores burbuja fina.....	251
Anexo A-5: Cotización de las rasquetas barrelos de los sedimentadores secundarios.....	257
Anexos B: Cotizaciones de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR).....	262
Anexo B-1: Cotización de la tecnología MBR (Etapa intermedia).....	263
Anexo B-2: Cotización de la tecnología MBR (Etapa II).....	285
Anexo B-3: Cotización de sustancias químicas estimadas para el Sistema de Operación de Membranas (MOS).....	308
Anexo B-4: Cotización de los rototamices para la tecnología MBR.....	311
Anexo C: Recomendaciones para la selección de equipo mecánico.....	315
Anexo D: Recomendaciones para la construcción del túnel de interconexión entre los terrenos Los Tajos.....	318

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de los parámetros DBO y DQO en la PTAR El Roble antes y después de la implementación de IFAS (en noviembre 2014).....	8
Figura 2. Diagrama de los procesos de tratamiento del agua residual.	12
Figura 3. Etapas comunes del tratamiento de lodos	14
Figura 4. Diagrama de flujo típico de un sistema LAC y tratamiento de lodos.	16
Figura 5. Diagrama esquemático para un sistema IFAS	20
Figura 6. Diagrama esquemático de un sistema MBBR.....	20
Figura 7. Sistema IFAS con biosportes móviles de polietileno (“ <i>carriers</i> ”) en la PTAR El Roble.....	21
Figura 8. Sistema IFAS con biosportes fijos de PVC.	22
Figura 9. Variedad de biosportes ActiveCell de Headworks Bio Inc.....	24
Figura 10. Potencial de retención de acuerdo al tamaño de partículas.....	27
Figura 11. Componentes típicos de un sistema de MBR.....	28
Figura 12. <i>Izquierda:</i> Esquema de módulos de membranas para un sMBR. <i>Derecha:</i> Módulos de membranas antes de ser colocado al sMBR.	29
Figura 13. Configuraciones principales de los sistemas MBR.....	29
Figura 14. Configuraciones de los sistemas sMBR (a) interno (i-sMBR) (b) externo (e-sMBR)	30
Figura 15. Secciones transversales de diferentes materiales de membranas de UF: (a) polímero y (b) cerámica.....	31
Figura 16. <i>Izquierda:</i> Esquema de membrana hoja plana. <i>Derecha:</i> fotografía de membrana tipo hoja plana.	33
Figura 17. <i>Izquierda:</i> Esquema de membrana fibra hueca. <i>Derecha:</i> fotografía de membrana tipo fibra hueca.	33
Figura 18. <i>Izquierda:</i> Esquema de membrana multitubo. <i>Derecha:</i> Fotografía de membrana tipo multitubo.	34
Figura 19. Atascos de materiales fibrosos en sistemas de MBR por insuficiencias en el pretratamiento (falta de rejillas extra finas). (a) Atascos en membranas de fibra hueca. (b) Atascos en tuberías de aireación.....	40
Figura 20. Diferentes tipos de residuos recolectados de un alcantarillado sanitario.....	40
Figura 21. Diferentes tipos de rejillas finas para pretratamiento de la tecnología MBR. ...	41
Figura 22. Métodos de limpieza de membranas.....	43
Figura 23. Aspectos importantes para la selección de la mejor tecnología de tratamiento de aguas residuales	52
Figura 24. Rutas de los colectores de agua residual hacia la PTAR Los Tajos	63
Figura 25. Mapa ubicación de los terrenos Tajos en el distrito Uruca, San José.	67
Figura 26. Terrenos Tajo Norte a la derecha y Tajo Sur a la izquierda, separados por el Puente de Piedra hacia la ciudadela La Carpio (ubicada en la parte superior de la fotografía).	

.....	68
Figura 27. Diseño de sitio mediante la tecnología de LAC para la etapa I, etapa intermedia y etapa II de la PTAR Los Tajos (propuesta Acciona Agua S.A.U.)	83
Figura 28. <i>A la izquierda:</i> Tanque IFAS con difusores de burbuja gruesa. <i>A la derecha:</i> Tanque LAC con discos difusores de burbuja fina. Fuente: SOLAMSA, 2014b.	90
Figura 29. Muro divisorio y cilindros retenedores de biosoportos en el tanque IFAS.....	91
Figura 30. Biopelícula sobre el medio de soporte plástico de la PTAR El Roble.....	91
Figura 31. Diagrama de Flujo del Proceso IFAS en El Roble.	92
Figura 32. Diagrama que ejemplifica el dimensionamiento de los biorreactores de la tecnología IFAS.....	111
Figura 33. Diseño de sitio mediante la tecnología de IFAS para la etapa intermedia y etapa II de la PTAR Los Tajos.....	112
Figura 34. Especificaciones del módulo de membrana seleccionado	114
Figura 35. Configuración de los módulos de membrana para un sistema MBR sumergido.	114
Figura 36. Esquema del prediseño mediante la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia).....	129
Figura 37. Esquema que ejemplifica la colocación del sistema de membranas para la PTAR Los Tajos	130
Figura 38. Diseño de sitio mediante la tecnología de MBR para la etapa intermedia y etapa II de la PTAR Los Tajos.....	131
Figura 39. Proyección lineal del crecimiento del caudal entre el 2018 y el 2025 y caudal constante a partir del 2026 hasta el 2046.....	183
Figura 40. Diagrama de flujo para el Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados Convencionales (LAC).....	188
Figura 41. Diagrama de flujo para el Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS).	190
Figura 42. Diagrama de flujo para el Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR).....	192
Figura 43. Diagrama esquemático de los criterios a considerar en el análisis multicriterio para la selección de la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos.	195
Figura 44. Gráfico de producción y demanda proyectadas para el Acueducto Metropolitano del AyA y zonas aledañas.....	205

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Capacidad de tratamiento de las PTARs más grandes de Centroamérica	6
Cuadro 2. PTARs operadas por el AyA con tecnología de lodos activados	7
Cuadro 3. Ejemplo de caracterización de aguas residuales crudas domésticas para Estados Unidos.....	11
Cuadro 4. Concentraciones promedio de efluente y remoción típica en sistemas LAC para aguas residuales domésticas	18
Cuadro 5. Eficiencias de remoción con unidades logarítmicas.....	18
Cuadro 6. Resumen comparativo de ventajas y desventajas de diferentes tipos de biosoportos.....	23
Cuadro 7. Características principales de las tres configuraciones de membranas más comunes.	35
Cuadro 8. Parámetros biológicos de diseño típicos de un sistema MBR municipal e industrial	37
Cuadro 9. Valores típicos para el diseño de membranas en un sistema sMBR.	38
Cuadro 10. Eficiencias de remoción en el sistema iMBR y calidad del efluente.	39
Cuadro 11. Agentes químicos utilizados para limpieza de membranas.	44
Cuadro 12. Ejemplo de protocolo limpieza CIP (<i>Cleaning-In-Place</i>) de mantenimiento semanal.	44
Cuadro 13. Razones fundamentales para la regeneración y el reúso del agua, sus beneficios y los factores que impulsan su implementación	49
Cuadro 14. Clasificación de los tipos de reúso de aguas residuales del RVRAR D.E.33601-MINAE-S.	50
Cuadro 15. Resumen componentes generales del proyecto 1 del PMAAMSJ en la etapa I.	62
Cuadro 16. Cantones y distritos beneficiados en la etapa I del PMAAMSJ.....	65
Cuadro 17. Caudales de aguas residuales proyectados al 2015 y 2025	69
Cuadro 18. Criterios para el cálculo de caudales de aguas residuales	69
Cuadro 19. Resumen de los promedios de la campaña de muestreo (2000-2002) para el PMAAMSJ	70
Cuadro 20. Calidad del efluente solicitada para el diseño de cada etapa de la PTAR Los Tajos	71
Cuadro 21. Comparación de los procesos de tratamiento analizados en el Estudio SAPROF.	76
Cuadro 22. Matriz de evaluación de los procesos de tratamiento.....	77
Cuadro 23. Dimensiones de cada módulo de reactor biológico según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.	81
Cuadro 24. Dimensiones de cada sedimentador secundario según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.	81

Cuadro 25. Distribución del porcentaje de aire en los tanques de aireación.....	87
Cuadro 26. Carga hidráulica y carga de sólidos resultante según Acciona Agua S.A.U....	88
Cuadro 27. Rangos típicos de tasas de carga hidráulica y de sólidos para el diseño de los sedimentadores secundarios	88
Cuadro 28. Cantidad de sedimentadores secundarios, áreas y volúmenes respectivos para las etapas intermedia y II, según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.	89
Cuadro 29. Requerimientos de oxígeno propuestos por Headworks Bio Inc. para la PTAR El Roble	91
Cuadro 30. Principales parámetros de calidad del agua residual (afluente y efluente) evaluados de agosto del 2013 a agosto del 2016 en la PTAR El Roble.	93
Cuadro 31. Porcentajes promedio de remoción de los principales parámetros de calidad del efluente en la PTAR El Roble evaluados de agosto del 2013 a agosto del 2016.	93
Cuadro 32. Dimensiones de cada módulo (biorreactor IFAS y biorreactor LAC) para la PTAR Los Tajos	96
Cuadro 33. Carga hidráulica y de sólidos propuestos para el prediseño de la tecnología IFAS	109
Cuadro 34. Dimensiones de los sedimentadores secundarios prediseñados para la tecnología IFAS.....	109
Cuadro 35. Cantidad de sedimentadores secundarios, áreas y volúmenes respectivos para las etapas intermedia y II, según el prediseño mediante la tecnología IFAS	109
Cuadro 36. Resumen de parámetros de diseño para la tecnología IFAS (datos por módulo)	110
Cuadro 37. Cantidad de unidades de tratamiento y dimensiones para la tecnología IFAS	110
Cuadro 38. Parámetros biocinéticos para el diseño biológico del MBR.....	115
Cuadro 39. Parámetros biológicos para el diseño por nitrificación	116
Cuadro 40. Parámetros de las fracciones biodegradables y no biodegradables del DQO	117
Cuadro 41. Resumen de resultados para el diseño biológico de la tecnología MBR (1 tren)	122
Cuadro 42. Dimensiones para un tren del sistema biológico de la tecnología MBR.....	123
Cuadro 43. Información del sistema de membranas y áreas nominales para la etapa intermedia	124
Cuadro 44. Dimensiones de cada tanque (tren) de membrana	124
Cuadro 45. Parámetros operativos para los difusores de burbuja fina y gruesa.....	126
Cuadro 46. Resumen de parámetros de diseño para la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos	127
Cuadro 47. Cantidad de unidades de tratamiento y dimensiones para la tecnología MBR	129
Cuadro 48. Áreas de terreno para la tecnología de LAC (etapa intermedia y etapa II)	132
Cuadro 49. Áreas de terreno para la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II) ...	133
Cuadro 50. Áreas de terreno para la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II) ...	134

Cuadro 51. Áreas totales de terreno para la PTAR Los Tajos, requeridas por cada tecnología	134
Cuadro 52. Calidad esperada del efluente mediante la tecnología de LAC (etapa intermedia y etapa II).....	136
Cuadro 53. Calidad esperada del efluente posterior a cada etapa de tratamiento secundario, mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II)	136
Cuadro 54. Calidad resultante del efluente mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II).....	137
Cuadro 55. Comparación de la calidad esperada del efluente de las tres tecnologías analizadas.....	137
Cuadro 56. Consumo energético del equipo para tratamiento secundario mediante LAC propuesto por Acciona Agua S.A.U. (etapa intermedia y etapa II).....	138
Cuadro 57. Consumo energético anual para el tratamiento secundario mediante LAC propuesto por Acciona Agua S.A.U. (etapa intermedia y etapa II).....	139
Cuadro 58. Consumo energético antes y después de la implementación de la tecnología IFAS en la PTAR El Roble.	140
Cuadro 59. Consumo energético del equipo para el tratamiento secundario mediante la tecnología IFAS de la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	141
Cuadro 60. Consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II)	141
Cuadro 61. Consumo energético del equipo para el tratamiento secundario mediante la tecnología MBR de la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	142
Cuadro 62. Consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II)	143
Cuadro 63. Consumos energéticos anuales por aireación para cada tecnología de tratamiento secundario analizada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	144
Cuadro 64. Consumos energéticos anuales por cada tecnología de tratamiento secundario estudiada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	144
Cuadro 65. Consumo energético por volumen de agua tratada, para cada tecnología de tratamiento secundario analizada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II) .	145
Cuadro 66. Costos de la adquisición de terreno para la PTAR Los Tajos, por cada tecnología y etapa.....	146
Cuadro 67. Desglose típico de rubros del costo de inversión total (se excluye el costo por la adquisición del terreno)	147
Cuadro 68. Montos globales de construcción de la etapa intermedia y etapa II para la PTAR Los Tajos	149
Cuadro 69. Unidades de tratamiento a ampliar en cada etapa	149
Cuadro 70. Costos estimados para los componentes a ampliar de la etapa I a la etapa intermedia.	151
Cuadro 71. Costos estimados para los componentes a ampliar de la etapa I a la etapa II.	151

Cuadro 72. Costos estimados para el tratamiento biológico por medio de LAC de la etapa intermedia y la etapa II (basados en costos del 2010)	151
Cuadro 73. Valor presente (al 2017) de los costos estimados para el tratamiento biológico de LAC para la etapa intermedia y la etapa II	152
Cuadro 74. Desglose de costos de inversión por rubro para la implementación de la tecnología LAC en la PTAR Los Tajos.....	152
Cuadro 75. Desglose de costos por rubros del “paquete IFAS” cotizado por la empresa Headworks para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	153
Cuadro 76. Costo total por rubro para el paquete IFAS con costos adicionales estimados	154
Cuadro 77. Costos de obra civil por componente de infraestructura para la tecnología IFAS (etapa intermedia y II)	155
Cuadro 78. Marcas y modelos del equipamiento mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)	156
Cuadro 79. Costos correspondientes al equipamiento mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)	157
Cuadro 80. Desglose de costos de inversión estimados para la implementación de la tecnología IFAS en la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	158
Cuadro 81. Desglose de costos por rubro del “paquete membranas” cotizado por Evoqua para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)	159
Cuadro 82. Costo total por rubro para el paquete membranas con costos adicionales estimados	160
Cuadro 83. Resumen de costos de obra civil para la implementación de la tecnología de MBR en la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).	161
Cuadro 84. Costos por equipamiento adicional para la PTAR Los Tajos, mediante la tecnología de MBR.....	161
Cuadro 85. Desglose de costos de inversión estimados para la implementación de la tecnología MBR en la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	163
Cuadro 86. Resumen de costos de inversión de la implementación del tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos, según cada tecnología analizada (etapa intermedia y etapa II)..	163
Cuadro 87. Costo por kWh para los diferentes períodos de cobro de la CNFL para la tarifa T-MT	164
Cuadro 88. Costos anuales por consumo energético para el tratamiento secundario mediante LAC propuesto por Acciona Agua S.A.U. (etapa intermedia y etapa II).....	167
Cuadro 89. Costos del personal requerido para la O&M del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de LAC (etapa intermedia y II)	167
Cuadro 90. Costos de mantenimiento del equipo estimados para la tecnología LAC (etapa intermedia y II)	168
Cuadro 91. Costos de O&M estimados para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de LAC (etapa intermedia y II)	169
Cuadro 92. Distribución de los costos de O&M de la tecnología LAC normalizados anuales	

con los porcentajes correspondientes (etapa intermedia y II).....	169
Cuadro 93. Costo por el consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos por medio de la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II).....	170
Cuadro 94. Costos del personal requerido para la O&M del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II).....	171
Cuadro 95. Costos de mantenimiento del equipo estimados para la tecnología IFAS (etapa intermedia y II)	172
Cuadro 96. Volúmenes necesarios de biosoportes para cada etapa del proyecto.	172
Cuadro 97. Cálculo de los costos por reemplazo de los biosoportes para la tecnología IFAS (etapa intermedia y II)	173
Cuadro 98. Costos de O&M estimados para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II).....	173
Cuadro 99. Distribución de costos de O&M de la tecnología IFAS normalizados anuales con los porcentajes correspondientes (etapa intermedia y II)	173
Cuadro 100. Costo del consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos por medio de la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II).....	174
Cuadro 101. Costos del personal requerido para la O&M del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y II)	175
Cuadro 102. Costo por consumo de sustancias químicas (etapa intermedia y etapa II) ...	176
Cuadro 103. Costos de mantenimiento del equipo estimados para la tecnología MBR (etapa intermedia y II)	177
Cuadro 104. Costos estimados por reemplazo de membranas de la tecnología MBR (etapa intermedia y II)	177
Cuadro 105. Costos de O&M estimados para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y II).....	178
Cuadro 106. Distribución de los costos de O&M de la tecnología MBR normalizados anuales con los porcentajes correspondientes (etapa intermedia y II).....	178
Cuadro 107. Costos anuales del consumo energético por cada tecnología de tratamiento secundario analizada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	179
Cuadro 108. Costos anuales por salarios de personal para cada tecnología de tratamiento secundario estudiada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).....	179
Cuadro 109. Costos estimados por el mantenimiento del equipo para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos para las tres tecnologías estudiadas (etapa intermedia y etapa II).....	180
Cuadro 110. Costos asociados al reemplazo de insumos (biosoportes y membranas) según el tipo de tecnología IFAS o MBR (etapa intermedia y etapa II).....	180
Cuadro 111. Calidad del efluente para ser evaluado en el canon ambiental por vertidos.	182
Cuadro 112. Costos del canon ambiental para el año de inicio de operación de la etapa intermedia (2020) y el final del período de análisis (2046).....	183
Cuadro 113. Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados	

Convencionales (LAC) (Valores en miles US\$)	189
Cuadro 114. Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) (Valores en miles US\$)	191
Cuadro 115. Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR) (Valores en miles US\$).....	193
Cuadro 116. Resumen de resultados del análisis financiero de las tres tecnologías analizadas	194
Cuadro 117. Niveles de importancia y coeficientes de ponderación asignados.....	196
Cuadro 118. Escala de valores de calificación para la evaluación de cada criterio.	196
Cuadro 119. Producción anual de lodos (secundarios) de cada tecnología.	202
Cuadro 120. Cantidad de lodos (secundarios) de desecho por unidad de volumen de agua residual a tratar	202
Cuadro 121. Matriz de análisis multicriterio para determinar la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos.....	207

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXOS	227
Anexos A: Cotizaciones de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS).....	227
Anexo A-1: Cotización del paquete de la tecnología IFAS	228
Anexo A-2: Cotizaciones de los sopladores	233
Anexo A-3: Cotizaciones de las bombas	246
Anexo A-4: Cotización e información técnica de los difusores burbuja fina	251
Anexo A-5: Cotización de las rasquetas barrelos de los sedimentadores secundarios	257
Anexos B: Cotizaciones de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR)	262
Anexo B-1: Cotización de la tecnología MBR (Etapa intermedia)	263
Anexo B-2: Cotización de la tecnología MBR (Etapa II).....	285
Anexo B-3: Cotización de sustancias químicas estimadas para el Sistema de Operación de Membranas (MOS).....	308
Anexo B-4: Cotización de los rototamices para la tecnología MBR.....	311
Anexo C: Recomendaciones para la selección de equipo mecánico	315
Anexo D: Recomendaciones para la construcción del túnel de interconexión entre los terrenos Los Tajos.....	318

LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

ARESEP	Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos
AS	Alcantarillado Sanitario
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
BCCR	Banco Central de Costa Rica
CF	Coliformes Fecales
CNFL	Compañía Nacional de Fuerza y Luz
DBO _{5,20}	Demanda Bioquímica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
DQO(s)	Demanda Química de Oxígeno (soluble)
EE.UU.	Estados Unidos de América
EH	Equivalente habitante
eMBR	Biorreactor de Membrana externo, por su siglas en inglés <i>external Membrane Bioreactor</i>
ESPH	Empresa de Servicios Públicos de Heredia
F/M	Relación Alimento/Microorganismos, por sus siglas en inglés <i>Food/Microorganism</i>
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, por sus siglas en inglés <i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GAM	Gran Área Metropolitana
GyA	Grasas y Aceites
HDPE	Polietileno de Alta Densidad, por sus siglas en inglés <i>High-Density Polyethylene</i>
I.V.	Impuesto de Ventas
IFAS	Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada, por su siglas en inglés <i>Integrated Fixed-Film Activated Sludge</i>
IGN	Instituto Geográfico Nacional
iMBR	Biorreactor de Membrana inmerso, por su siglas en inglés <i>immersed Membrane Bioreactor</i>
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
IPC	Índice de Precios al Consumidor
JBIC	Banco Japonés para la Cooperación Internacional, por su siglas en inglés <i>Japan Bank for International Cooperation</i>
JICA	Agencia de Cooperación Internacional Japonesa, por sus siglas en inglés <i>Japan International Cooperation Agency</i>
L.P.I.	Licitación Pública Internacional
LAC	Lodos Activados Convencionales
LAE	Lodos Activados de Aireación Extendida
LMP	Límite Máximo Permisible
LMSS	Licor de Mezcla de Sólidos Suspendidos
LMSSV	Licor de Mezcla de Sólidos Suspendidos Volátiles

MBR	Biorreactor de Membrana, por su siglas en inglés <i>Membrane Bioreactor</i>
MF	Microfiltración
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MOS	Sistema de Operación de Membranas, por sus siglas en inglés <i>Membrane Operating System</i>
MS	Ministerio de Salud
ND	No hay datos
NTK	Nitrógeno Total Kjeldahl
O&M	Operación y Mantenimiento
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
p.e.	Personas equivalentes
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidad
PES	Polietilsulfonas
pH	Potencial de hidrógeno
PIB	Producto Interno Bruto
PLAN-GAM	Plan de la Gran Área Metropolitana (Consejo Nacional de Planificación Urbana, 2013)
PMAAMSJ	Proyecto Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José
PNSAR	Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales
PP	Polipropileno
PRUGAM	Plan Regional Urbano de la Gran Área Metropolitana (MIVAH, 2008)
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PVC	Policloruro de vinilo, por sus siglas en inglés <i>polyvinyl chloride</i>
PVDF	Difluoruro de polivinilideno, por sus siglas en inglés <i>polyvinylidene difluoride</i>
QMD	Caudal Máximo Diario
QMH	Caudal Máximo Horario
QPD	Caudal Promedio Diario
RVRAR	Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales, Decreto Ejecutivo N°33601-MINAE-S
RyT	Recolección y Tratamiento
S.A.U.	Sociedad Anónima Unipersonal (en España)
SAAM	Sustancias Activas al Azul de Metileno
SAPROF	Estudios de Asistencia Especial para la Formación de Proyectos, por sus siglas en inglés <i>Special Assistance for Project Formulation</i>
SCFM	Pies cúbicos por minuto a condiciones estándar, por sus siglas en inglés <i>Standard cubic feet per minute</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
SG-GAM	Subgerencia de Gestión de Sistemas del Gran Área Metropolitana
SOLAMSA	Soluciones Técnicas Ambientales S.A.

SSed	Sólidos Sedimentables
SST	Sólidos Suspendidos Totales
SSV	Sólidos Suspendidos Volátiles
STAR	Sistema de Tratamiento de Aguas Residuales
T	Temperatura
TA	Tanque de Aireación
TdR	Términos de Referencia
T-MT	Tarifa (eléctrica) de Media Tensión
TRH	Tiempo de Retención Hidráulico
TRS	Tiempo de Retención del Sólido
UASB	Reactor anaeróbico de flujo ascendente, por sus siglas en inglés <i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UE	Unidad Ejecutora
UEN	Unidad Estratégica de Negocios
UF	Ultrafiltración
UNT	Unidades Nefelométricas de Turbiedad
US\$	Dólares Estadounidenses
VAC	Valor Actual de Costos

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El tema de la recolección y el tratamiento de las aguas residuales en Costa Rica, ha tenido un desarrollo y evolución tardíos. Según el diagnóstico realizado para la Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (PNSAR) 2016 – 2045, el país ha realizado avances importantes en el sub-sector de agua potable; sin embargo, se encuentran serios rezagos en saneamiento (MINAE, MS y AyA, 2016).

Francisco Angulo (2015) en el informe del Estado de la Nación “Gestión del recurso hídrico y saneamiento en Costa Rica”, indica que el 71,5% de las viviendas utilizan el tanque séptico como sistema de tratamiento, un 26,6% de las viviendas cuenta con cobertura de alcantarillado sanitario (con y sin tratamiento), un 1,5% mediante letrina y 0,4% de las viviendas no cuentan con sistema de saneamiento. Es evidente el alto porcentaje de utilización de sistemas tipo tanque séptico en muchas zonas del país.

Durante los años 60, en la ciudad de San José, fue construido el sistema de recolección de las aguas residuales de tipo separado (no combina las aguas residuales con las aguas pluviales), cuyo objetivo era que las tuberías de alcantarillado sanitario recolectaran las aguas residuales y éstas fueran tratadas en pequeñas Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs) distribuidas en diferentes puntos de la ciudad. Sin embargo, debido al rápido crecimiento urbano -con la consecuente no planificada expansión de la ciudad- la red de alcantarillado sanitario resultó insuficiente (en cantidad y capacidad), lo que provocó una proliferación de conexiones ilegales del sistema sanitario al pluvial. Además, las pequeñas PTARs existentes fueron abandonadas debido a la falta de recursos económicos que impidió mantenerlas operando adecuadamente (Equipo SAPROF, 2004). Resultado de lo anterior, durante décadas las aguas residuales recolectadas en el alcantarillado sanitario, se vierten directamente a los ríos, sin ningún tipo de tratamiento.

Frente a esta problemática, el Gobierno de Costa Rica colocó en alta prioridad el proyecto del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), denominado Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José (PMAAMSJ), solicitando un préstamo al Banco de Japón para la Cooperación Internacional “JBIC” por sus siglas en

inglés (*Japan Bank for International Cooperation*). El banco JBIC envió una misión de investigación a Costa Rica, en julio del 2003, compuesta por un equipo de japoneses expertos en temas de saneamiento, para la realización de los Estudios de Asistencia Especial para la Formación de Proyectos “SAPROF” por sus siglas en inglés (*Special Assistance for Project Formulation*).

Los estudios SAPROF analizaron de manera técnica-económica y ambiental los aspectos más importantes del PMAAMSJ, incluyendo la recomendación de la tecnología de tratamiento más apropiada para la PTAR de la ciudad de San José (Equipo SAPROF, 2004). Dichos estudios se realizaron con el apoyo del equipo de contraparte del AyA. El informe final fue entregado en setiembre del 2004.

La Sala Constitucional solicitó al AyA mediante el Voto N°13029-06¹ (setiembre del 2006), que se realicen las acciones necesarias para solucionar el problema de descargas de las aguas residuales a los ríos del área metropolitana (Sala Constitucional, 2006). Posteriormente, en noviembre del 2006, se decreta por medio de la Ley N°8559 de la Asamblea Legislativa, la Aprobación del Contrato de Préstamo Externo N° CR-P4, suscrito por el gobierno de la República de Costa Rica y el JBIC, para financiar el PMAAMSJ (Brenes, 2009).

El PMAAMSJ está compuesto por dos grandes proyectos que contemplan: (1) el diseño y la construcción de obras de extensión y la rehabilitación de las redes del alcantarillado sanitario del área metropolitana; y (2) el diseño, la construcción, el equipamiento y la operación asistida de la PTAR Los Tajos (Brenes, 2009).

La construcción de esta PTAR se planificó por etapas. La etapa I (que actualmente ya fue construida) comprende: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento de lodos y de olores; la etapa intermedia donde se incorporará el tratamiento secundario y algunas obras complementarias (como los sistemas modulares que ampliarán el tratamiento de lodos); y finalmente la etapa II, donde se aumentaría el caudal de entrada, con el consecuente aumento de la capacidad de las diferentes unidades de tratamiento existentes. El PMAAMSJ completo se proyectó para finalizar en el 2025 (Barboza, 2014).

¹ Voto N°13029-06 de la Sala Constitucional ordena a la Gerencia del AyA que “tome las acciones necesarias para lograr una adecuada solución integral al problema de las aguas residuales del área metropolitana, y en consecuencia, se detenga el continuo deterioro de los acuíferos del Valle Central”.

El terreno donde se construyó la etapa I de la PTAR se ubica en la Uruca, aproximadamente a 3,5 km del Hospital México, sobre la carretera que comunica con la ciudadela La Carpio (Jiménez, 2012) y que fue adquirido por el AyA en enero del 2010. Frente a este terreno, separado por el Puente de Piedra, se encuentra otro terreno disponible para la ampliación de la PTAR. Anteriormente, ambos terrenos correspondían a tajos de extracción de material de construcción: Tajo Sur (en la margen derecha del Río Torres, cuya área es de 13,56 ha) y Tajo Norte (en la margen izquierda del Río Virilla), lo que motivó a nombrar a esta planta la PTAR Los Tajos (Araya, 2015).

Posterior a la promulgación de la Ley N°8559 (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2006), el AyA creó la Unidad Ejecutora (UE) AyA-JBIC², la cual estaba compuesta por un equipo de funcionarios del AyA, profesionales de diferentes disciplinas encargados de la administración, ejecución y contraparte del PMAAMSJ (Brenes, 2009).

Consolidado el equipo de la UE AyA-JBIC, se inició el trabajo del diseño sanitario y el dimensionamiento de la PTAR Los Tajos, a cargo de los profesionales en ingeniería. El diseño sanitario consideró las etapas I y II, por lo que se dimensionaron todas las unidades de tratamiento, incluyendo la fase de tratamiento secundario, mediante la tecnología más apropiada según las recomendaciones del estudio SAPROF, de Lodos Activados Convencionales (LAC). Además, se diseñó el tratamiento completo de lodos, incluyendo los biodigestores anaerobios, los cuales no fueron considerados en el análisis SAPROF. Ya con el diseño sanitario de la PTAR Los Tajos, esta Unidad Ejecutora procedió a redactar los Términos de Referencia (TdR) para la construcción “llave en mano” de la etapa I de la PTAR Los Tajos (Araya, 2015).

El 21 de mayo del 2010, como parte del proceso de la Licitación Pública Internacional N°2008-0002-PRI, fue adjudicada la construcción “llave en mano” de la etapa I de la PTAR Los Tajos, a la empresa española *Acciona Agua S.A.U.*, por un monto de US\$44.616.880,00 y un plazo de ejecución de 48 meses (AyA, 2010). El 12 de setiembre del 2012, se firmó el

² Según el Acuerdo N°2015-548 de la Junta Directiva del AyA con fecha del 15/12/2015, se aprueba la integración de las Unidades Ejecutoras del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José (UE-AyA-JBIC) y la Unidad Coordinadora del Programa de Agua Potable y Saneamiento (UE AyA-BID) en una nueva Unidad Ejecutora “Programa de Agua Potable y Saneamiento” (UE-PAPS) del AyA.

contrato y la orden de inicio se emitió el 01 de noviembre del 2012. La construcción inició en marzo del 2013 (Barboza, 2014).

La etapa I consta de un conjunto de infraestructura que incluye un edificio administrativo (oficinas, laboratorio, cuarto de control, mini-auditorio) y el operativo; todo el sistema que corresponde al tratamiento preliminar para la remoción de sólidos gruesos, sólidos finos, grasas y arenas (pozo de sólidos gruesos, rejillas, desengrasadores y desarenadores), seguido de un tratamiento primario (sedimentadores primarios); posteriormente se tratarán los lodos hasta convertirlos en biosólidos seguros (espesamiento, digestión anaeróbica, deshidratación y estabilización) antes de su disposición final en un relleno sanitario. También, incluye un sistema de cogeneración eléctrica a través del biogás producido por los digestores de lodos (Jiménez, 2012).

El efluente resultante de la etapa I está siendo vertido al Río Torres, y por contar únicamente con pretratamiento y tratamiento primario, el mismo no cumple con todos los parámetros físico-químicos establecidos en el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (RVRAR) Decreto Ejecutivo N°33601-MINAE-S, aspecto que está permitido legalmente para este proyecto, pues por medio del Decreto Ejecutivo N°32133 MINAE-S, en el 2004 se declara que podrá tenerse un desarrollo progresivo de los sistemas de tratamiento, incrementando gradualmente los porcentajes de remoción de contaminantes, hasta que el efluente de la PTAR cumpla con los límites máximos permisibles (LMP) de vertido indicados en la normativa nacional (Jiménez, 2012).

El AyA solicita en el cartel de la Licitación Pública Internacional N°2008-0002-PRI, el prediseño hidráulico y sanitario del tratamiento secundario para la etapa intermedia y etapa II de la PTAR, mediante la tecnología de LAC (AyA, 2010), por lo que la empresa Acciona Agua S.A.U., incluye en su Plan Maestro el dimensionamiento de las unidades de tratamiento con esta tecnología, y a la vez, especifica el aumento de la capacidad de todas las unidades, debido al futuro aumento de caudal a tratar para la etapa II (Barboza, 2014).

Cumpliendo con el decreto de gradualidad, se debe continuar con los procesos de tratamiento de las aguas residuales, programados en las siguientes etapas constructivas de la PTAR (etapa intermedia y etapa II). Actualmente, el AyA se encuentra en la búsqueda de financiamiento para diseñar y ejecutar las siguientes etapas de la PTAR Los Tajos (Araya, 2015).

1.2. Justificación

Costa Rica se ha proyectado a nivel mundial como un “país verde”, lo que se apoyó desde el 2008 en el resultado del Índice de Desempeño Ambiental “EPI”³ (por sus siglas en inglés *Environmental Performance Index*) de la Universidad de Yale, pues el país se había encontrado entre las primeras cinco posiciones. Similar a este índice, existen algunos otros que también evalúan aspectos sociales, económicos y ambientales que han colocado a Costa Rica en lugares privilegiados, tales como el Índice del Planeta Feliz (*Happy Planet Index*) del Foro Económico Mundial (WEFORUM) que, en julio del 2016, situó a Costa Rica en la primera posición como el país más feliz y sostenible del planeta (Bruce, 2016).

La metodología de cálculo del EPI se modifica con los años (MINAE, MS y AyA, 2016), tal es el caso del EPI del 2014, donde incorporó nuevos indicadores y nuevas categorías de evaluación, tales como: manejo de aguas residuales, regulación de los agroquímicos, tendencias con respecto a la huella de carbono, entre otros. Al incluirse estos nuevos aspectos, Costa Rica bajó considerablemente su posición pasando del 5° lugar en el 2012, al 54° en el 2014. Actualmente, Costa Rica se encuentra en la posición 42° (UCR, 2017) debido al incremento en el uso de fuentes renovables para la producción de energía eléctrica en el 2015 (Presidencia de la República, 2016a).

Como se evidencia en el negativo cambio de posición de Costa Rica en el EPI, existen aspectos medioambientales que no se han desempeñado adecuadamente, principalmente: mayores emisiones de carbono en proporción a su PIB (donde se encuentra la gestión del sector transportes), pérdida de cobertura forestal, mal manejo de residuos sólidos y deficiencia en el tratamiento de las aguas residuales (Presidencia de la República, 2016a).

El PMAAMSJ es el proyecto más grande en materia de inversión que se ha hecho en la historia del AyA. Por su parte, la PTAR Los Tajos es el proyecto con mayor beneficio a nivel de tratamiento de aguas residuales del país, pues se proyecta que tratará las aguas residuales

3 El Índice de Desempeño Ambiental “EPI” fue desarrollado por el Centro de Política y Ley Ambiental de la Universidad de Yale, en conjunto con la Red de Información del Centro Internacional de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Columbia. Este índice cuantifica y clasifica numéricamente el desempeño de las políticas de un país en temas ambientales de alta prioridad, según dos áreas: la protección de la salud humana (Agua y Saneamiento, Calidad del Aire e Impactos en la Salud) y la protección de los ecosistemas (Clima y Energía, Biodiversidad y Hábitat, Pesca, Bosques, Agricultura, Recursos de Agua).

generadas por aproximadamente 1.070.000 habitantes (en su etapa I) y 1.600.000 habitantes (en su etapa II) de los cantones más numerosos del área metropolitana de la provincia de San José (Jiménez, 2012). Esta PTAR será la más grande de Centroamérica, pues está proyectada para tratar un caudal 2,81 m³/s desde su etapa I y de 4,26 m³/s en su etapa II (Presidencia de la República, 2016b). En el Cuadro 1 se indican las capacidades de caudal a tratar para las tres PTARs más grandes de Centroamérica (Chavarría, 2016).

Cuadro 1. Capacidad de tratamiento de las PTARs más grandes de Centroamérica

País	Nombre de la PTAR	Caudal a tratar (m ³ /s)
Costa Rica	PTAR Los Tajos (etapa I)	2,81
Nicaragua	PTAR de Managua	2,08
Panamá	PTAR Juan Díaz	2,20

Fuente: Chavarría, 2016.

Al dar un adecuado manejo, tratamiento y disposición de las aguas residuales, se reduce la contaminación de los principales ríos que pertenecen a la cuenca del Río Grande de Tárcoles, se reducirán los malos olores y la cantidad de enfermedades infecciosas y parasitarias que se propagan por medio de las aguas residuales, mejorará el entorno de las viviendas (paisajismo), aportará beneficios a los ecosistemas que interactúan con los cuerpos de agua, entre otros beneficios. Con todo lo anterior, mejorará la salud ambiental de la ciudad de San José, aumentará la calidad de vida y el bienestar social de sus habitantes (AyA, 2014). La entrada en operación de la PTAR Los Tajos, mejorará el resultado de Costa Rica en los diversos índices de desempeño ambiental que se aplican a nivel mundial, tal como el EPI (Huertas y Sauma, 2015).

La PTAR Los Tajos es un proyecto que tratará una importante cantidad de aguas residuales (AyA, 2014), por lo que el área de terreno requerida para el tratamiento de estas aguas será cuantiosa. Previendo la posibilidad a futuro que en la PTAR se reciban aguas residuales provenientes de otros cantones de la GAM, es de importancia institucional y nacional analizar, además de la tecnología de LAC, otras tecnologías más compactas, de manera que puedan compararse entre sí las diferentes opciones, tomando en cuenta aspectos técnicos, económicos, ambientales, sociales, entre otros; para determinar la mejor tecnología a implementar en la PTAR Los Tajos (Araya, 2015).

Previo al proceso de licitación para la construcción de la etapa intermedia, se requiere realizar un estudio comparativo entre varias posibles tecnologías de tratamiento secundario. Como aporte colaborativo para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), este Trabajo Final de Graduación (TFG) pretende ser un insumo importante para el proceso de selección de la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR, comparando tres tecnologías de diferentes requerimientos operativos: Lodos Activados Convencionales (LAC), Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membrana (MBR).

La tecnología de lodos activados cuenta con muchos años de conocimiento a nivel mundial. Fue incorporada como sistema de tratamiento de aguas residuales alrededor de 1920 en Inglaterra (IMTA, 2009). Esta tecnología es comúnmente utilizada a nivel nacional, tanto para el tratamiento de las aguas residuales domésticas, como industriales. El AyA opera varias PTARs bajo esta tecnología, con sus variantes “convencional” y “aireación extendida” (AyA, 2016c), las cuales se enlistan en el siguiente cuadro:

Cuadro 2. PTARs operadas por el AyA con tecnología de lodos activados

Nombre	Ubicación	Tecnología	QPD (l/s)
Los Reyes	La Guácima Alajuela	Lodos Activados Convencional	3,5
Don Edwin	Jiménez, Pococí	Lodos Activados Aireación Extendida	1,7
Boruca	Buenos Aires, Puntarenas	Lodos Activados Aireación Extendida	0,7
Montelindo	Moravia, San José	Lodos Activados Aireación Extendida	0,4
André Challé	Moravia, San José	Lodos Activados Aireación Extendida	4,0
Rincón Verde II	San Pablo, Heredia	Lodos Activados Aireación Extendida	2,4
Boulevard las Palmas	Mora, San José	Lodos Activados Aireación Extendida	3,1
Santa Isabel	San Pablo, Heredia	Lodos Activados Aireación Extendida	0,4

Fuente: AyA, 2016c.

La tecnología de IFAS es una modificación de la tecnología de LAC, que fue implementada con biosoportres plásticos a inicios de la década de los 80 en Noruega (WEF, 2011). A partir de noviembre del 2014, la tecnología de IFAS fue implementada por primera vez por el AyA en la PTAR de El Roble de Puntarenas. Esta PTAR anteriormente utilizaba la tecnología de LAC; sin embargo, fue necesario aumentar su capacidad de tratamiento y tener una mejor calidad del efluente, por lo que, a partir de un análisis realizado por el AyA, se determinó modificar el sistema, y pasar a la tecnología de IFAS, obteniéndose resultados muy positivos en la calidad del efluente final (Lazo y Araya, 2015).

La Figura 1 muestra la comparación de los parámetros: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) -gráfico de la izquierda- y Demanda Química de Oxígeno (DQO) -gráfico de la derecha-, donde se refleja una importante mejora en la calidad del efluente a partir de la entrada en operación de la tecnología IFAS en la PTAR El Roble, en noviembre del 2014.

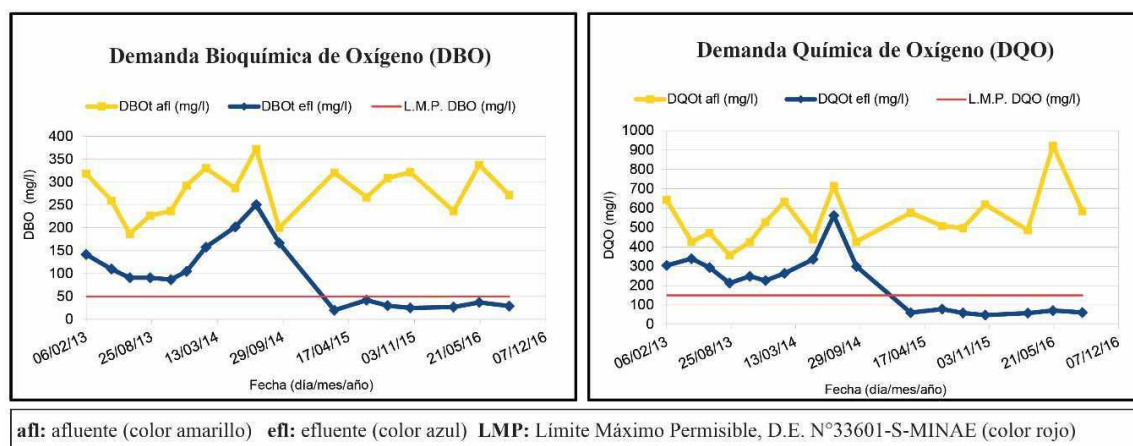


Figura 1. Comparación de los parámetros DBO y DQO en la PTAR El Roble antes y después de la implementación de IFAS (en noviembre 2014).

Fuente: AyA, 2016c.

La tecnología de MBR es muy reciente. Fue en 1989 cuando por primera vez se sumergió una membrana dentro de un reactor para tratar el agua por medio de succión a través de las membranas (Hai, Yamamoto y Lee, 2014). Actualmente, se utiliza como sustitución de la tecnología de LAC con tratamiento terciario, mayoritariamente en Europa y Japón. En Latinoamérica ha sido implementada principalmente para tratamiento de aguas especiales (en hoteles o actividades industriales). Recientemente, la tecnología de MBR ha sido implementada para aguas residuales municipales como en el caso de la PTAR Campos do Jordao ($0,35 \text{ m}^3/\text{s}$) y PTAR ABC-Proyecto Aquapolo ($1 \text{ m}^3/\text{s}$) ambas administradas por la SABESP en Brasil (Araya, 2014).

Una PTAR con la tecnología MBR es muy compacta. La principal ventaja de esta tecnología es la poca necesidad de terreno que requiere, además que su efluente final es de excelente calidad, teniendo la posibilidad de reusar las aguas tratadas. Sin embargo, al ser una tecnología muy nueva, requiere un conjunto de técnicas avanzadas de operación y mantenimiento, aspecto importante a considerar (Brepols, 2011).

Este TFG aporta los prediseños de dos tecnologías poco comunes (IFAS y MBR), y la comparación técnica, ambiental, social y financiera de las tres tecnologías antes descritas, todas de tipo aeróbicas y compactas (unas más que otras), pero con significativas diferencias, principalmente a nivel de diseño, costos y labores de operación, que van desde una tecnología convencional (LAC), seguida de una tecnología intermedia que modifica a la convencional (IFAS), hasta una de las tecnologías más avanzadas de tratamiento de aguas residuales a nivel mundial (MBR). Adicionalmente, el aporte de las estimaciones de costos aproximados de la implementación de cada tecnología, son insumos para la búsqueda del financiamiento para las siguientes etapas de construcción de la PTAR.

Esta investigación es una importante contribución para la toma de decisión por parte del AyA, para la selección de la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. El tratamiento de las aguas residuales

2.1.1. Definición de aguas residuales

El RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33601-MINAE-S) define agua residual como “toda agua que ha recibido un uso y cuya calidad ha sido modificada por la incorporación de agentes contaminantes”. Así mismo, existen diferentes clasificaciones de las aguas residuales según el ente generador, y en dicho Reglamento se reconocen dos tipos: aguas residuales ordinarias y aguas residuales especiales.

Las aguas residuales de tipo ordinario son aquellas generadas por las actividades domésticas del ser humano, tales como: preparación de alimentos, lavado de ropa, uso de inodoros, duchas, lavatorios, entre otras. Las aguas residuales de tipo especial son todas las que no corresponden a las de tipo ordinario, por ejemplo, las aguas provenientes de procesos industriales (Decreto Ejecutivo N°33601 MINAE-S, 2007). Al conjunto de aguas residuales cuya calidad es de tipo ordinaria y que son conducidas por medio de un sistema de alcantarillado sanitario, se les conoce como “aguas residuales municipales” (CEPIS et al., 1991).

Los contaminantes más comunes presentes en las aguas residuales municipales son: materiales flotantes (grasas y aceites, plásticos, celulosa), materia coloidal y disuelta (orina, heces, aceites, grasas en emulsión, tensoactivos, detergentes, microorganismos patógenos, carbohidrato, sales, compuestos que contienen nitrógeno, entre otros) y materiales sedimentables (restos de alimentos, cabellos, arenas) (Confederación Hidrográfica del Duero, 2013).

Las aguas residuales domésticas pueden considerarse peligrosas debido a la alta probabilidad de presencia de microorganismos patógenos como algunas bacterias (*Escherichia coli* que es un indicador de contaminación fecal en las aguas), virus, parásitos (huevos de helminto) y otras bacterias (como la salmonella). También hay presencia de microorganismos no patógenos, fermentadores y enzimas, que descomponen la materia orgánica mediante hidrólisis, reducción y oxidación, etc. (CEPIS et al., 1991).

El Cuadro 3 muestra los parámetros físico-químicos típicos que caracterizan el agua residual

doméstica cruda en EE.UU.

Cuadro 3. Ejemplo de caracterización de aguas residuales crudas domésticas para Estados Unidos.

Parámetro	Concentración (mg/l)
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	430
Demanda Biológica de Oxígeno (DBO ₅)	190
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	210
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	160
Nitrógeno Total Kjeldahl (NTK)	40
Fósforo Total	7
Alcalinidad	200

Fuente: Tchobanoglous et al., 2004.

Todas las aguas residuales deben ser debidamente tratadas antes de su disposición final, sean éstas descargadas a un cuerpo de agua superficial o para su posterior reutilización. Así como se estipula en la legislación nacional, toda agua vertida o reusada debe cumplir con los límites permisibles de vertido indicados en el RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33601-MINAE-S), con el objetivo de reducir cualquier tipo de contaminación hídrica.

Un adecuado tratamiento de las aguas residuales, permite mejorar la calidad de los ríos, así como también el mejoramiento del paisaje y del hábitat de la flora y fauna (acuática y terrestre). Esto contribuye al mejoramiento de la calidad de vida de la población, ya que el saneamiento de las aguas residuales está directamente relacionado a la salud pública, pues se reducen las enfermedades de transmisión hídrica (MINAE, MS y AyA, 2016). Además, minimiza la afectación de las fuentes de agua disponibles para el abastecimiento humano, y se reducen los costos de tratamiento de agua potable (Asano et al., 2007).

2.1.2. Procesos de tratamiento de las aguas residuales

El tratamiento de las aguas residuales consiste en la eliminación de la contaminación y de las impurezas que se encuentren en el agua a tratar. Comúnmente, este proceso se lleva a cabo en una PTAR. Dependiendo del tipo y de las características del agua residual que ingresa (afluente) y la calidad que se requiere en el agua a descargar (efluente), así se determinarán los distintos procesos para la depuración de estas aguas, pudiendo ser por medio de procesos físicos, químicos o biológicos (Hernández, 1996).

Los procesos de tratamiento en una PTAR, constan de una secuencia de operaciones unitarias que buscan eliminar un tamaño determinado de partícula, decreciente conforme se avanza en

las operaciones unitarias. Generalmente, la dificultad del proceso aumenta con la disminución del tamaño de la partícula, lo que implica que las operaciones unitarias sean cada vez más complejas hacia el final del tratamiento (Centeno, 2011).

Guiándose con dicha dificultad para la eliminación de los contaminantes, tradicionalmente, los procesos de tratamiento en una PTAR se dividen en: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento secundario y terciario (Figura 2) (Centeno, 2011). Paralelamente al proceso de tratamiento del agua residual, se requiere de un manejo, tratamiento y disposición final adecuada de los lodos y otros residuos sólidos, producidos en los diferentes procesos de la depuración (Briceño, 2016).

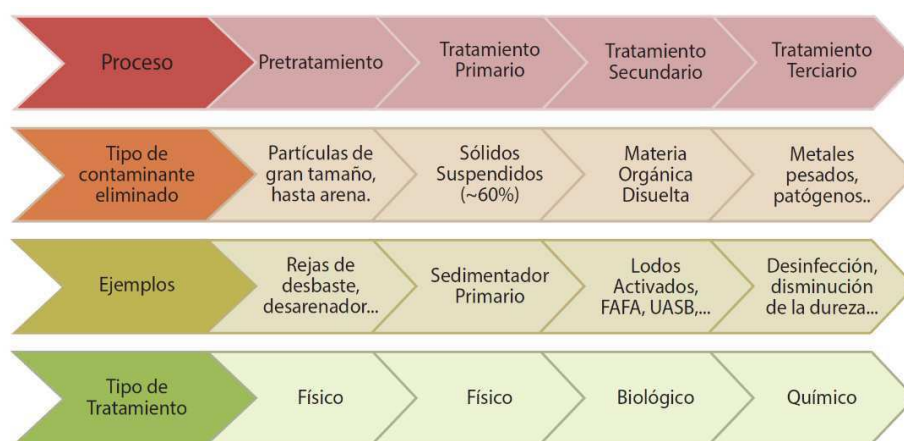


Figura 2. Diagrama de los procesos de tratamiento del agua residual.

Fuente: Centeno, 2011.

- **Pretratamiento (tratamiento preliminar)**

El pretratamiento incluye los procesos físicos que remueven partículas de gran tamaño, sólidos gruesos suspendidos y arenas. Algunos de estos procesos son: desbaste o cribado (retención de sólidos mediante rejillas y tamices), desarenado (eliminación de arenas), desengrasado (eliminación de grasas y aceites) y homogenización (procesos para amortiguar variaciones de caudal y cargas orgánicas) (Sperling, 2007a).

- **Tratamiento Primario**

El tratamiento primario tiene por objeto remover parcialmente (60% a 70%) los sólidos suspendidos, la materia orgánica y los organismos patógenos -asociados a dichos sólidos-

mediante la sedimentación (Sperling, 2007a).

- **Tratamiento Secundario**

Etapas de tratamiento donde predominan los procesos biológicos, donde mediante la acción enzimática y metabólica (crecimiento y reproducción) de ciertos microorganismos, se degrada la materia orgánica, los sólidos orgánicos disueltos y en algunas ocasiones nutrientes (nitrógeno y fósforo) (Hernández, 1996 y Sperling, 2007a), presentándose la formación de flóculos, con peso suficiente para su posterior separación (Hernández, 1996). Estos procesos pueden realizarse en medios con oxígeno presente (aerobios), o sin oxígeno (anaerobios) (Hernández, 1996).

- **Tratamiento Terciario (tratamiento avanzado)**

Etapas de tratamiento que busca la eliminación de los contaminantes específicos, ya sean tóxicos, o compuestos no biodegradables (metales pesados, contaminantes emergentes, etc.). También, implica la remoción complementaria de los contaminantes que no fue posible eliminar durante el tratamiento secundario, como los microorganismos patógenos, los nutrientes o los sólidos suspendidos remanentes (Sperling, 2007a).

Para el tratamiento de microorganismos patógenos, los procesos químicos más utilizados son mediante la adición de compuestos desinfectantes (como el hipoclorito de sodio o el hipoclorito de calcio, entre otros). Otros procesos que se también se utilizan son los de filtración (Briceño, 2016).

2.1.3. Procesos de tratamiento de los lodos residuales de PTARs

El lodo extraído y producido en el proceso de tratamiento de las aguas residuales, también requiere de tratamiento para su disposición adecuada. Los principales procesos de tratamiento son: (1) espesamiento, (2) estabilización (digestión), (3) acondicionamiento, (4) deshidratación y (5) disposición final (Briceño, 2016). En la Figura 3 se muestra un esquema con las características de cada una de estas etapas.

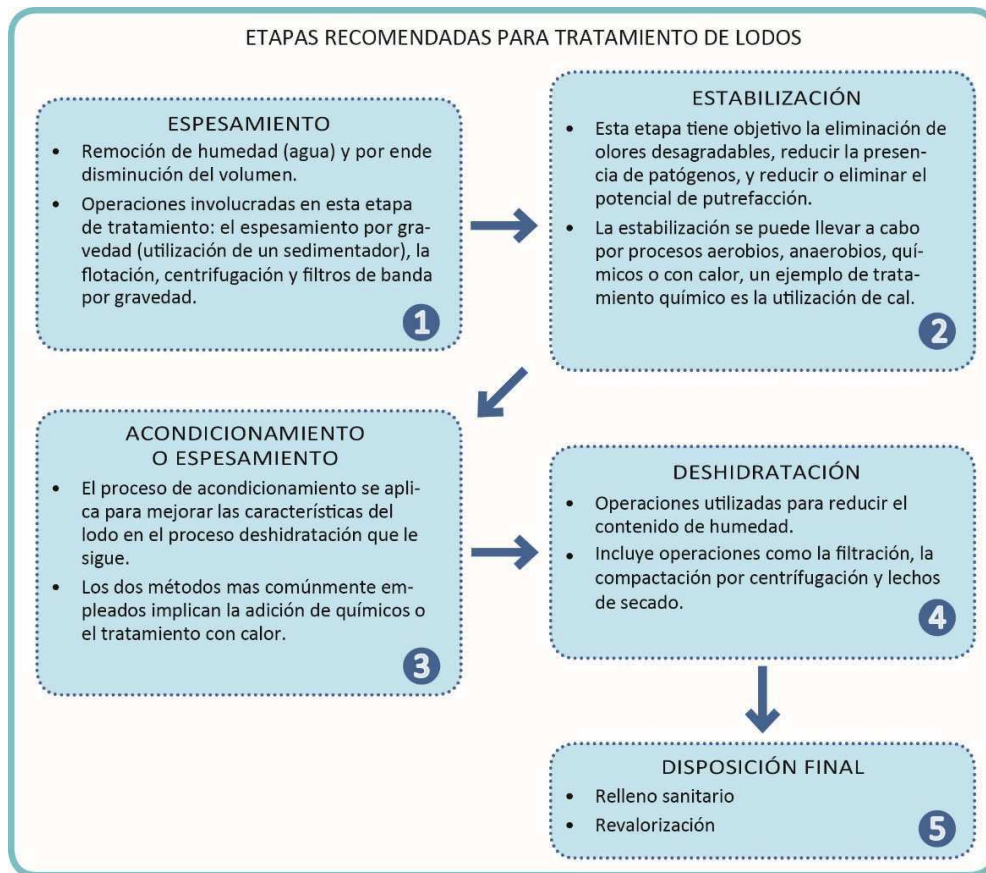


Figura 3. Etapas comunes del tratamiento de lodos
Fuente: Briceño, 2016.

2.1.4. Procesos de tratamiento de los olores en PTARs

Los diferentes procesos de tratamiento de las aguas residuales y de los lodos, generan gases que desprenden olores desagradables, principalmente compuestos químicos con azufre, como el sulfuro de hidrógeno, mercaptanos, etc. (Briceño, 2016). Estos olores se desprenden debido a la descomposición de la materia orgánica, también por la acumulación de los residuos, los tiempos de retención altos, la insuficiente aireación, entre otros factores operativos. Para el tratamiento de olores se pueden utilizar:

- *Procesos químicos:* adicionando reactivos (como sales metálicas, oxidantes fuertes, entre otros) o tratamientos de absorción (*scrubbers*) y de adsorción (con carbón activado).
- *Procesos biológicos:* por ejemplo, la biofiltración con un soporte orgánico (Pérez, 2009).

2.2. Lodos Activados Convencionales (LAC)

2.2.1 Componentes y funcionamiento del sistema LAC

Los lodos activados corresponden a un sistema de tratamiento biológico de tipo aeróbico. En este sistema los microorganismos (principalmente bacterias, protozoos y otros) degradan (metabolizan) la materia orgánica presente en las aguas residuales, formando flóculos macroscópicos que se encuentran en suspensión debido al continuo movimiento provocado por la agitación mecánica o la aireación que se da en el reactor (Hernández, 1996). Posteriormente, el agua residual pasa a un sedimentador donde por gravedad los flóculos se aglutinan en una matriz gelatinosa, facilitando su sedimentación, permitiendo extraer el agua residual clarificada (Sperling, 2007b).

Existen diversas variaciones de la tecnología de lodos activados, las cuales se clasifican según diferentes características. Las variaciones más comunes son en términos de la edad del lodo y la relación de Alimento/Microorganismos (F/M) (parámetros que serán definidos en la sección 2.2.2). En función de estos parámetros, se clasifican en:

- LAC: baja edad del lodo y alta relación F/M.
- Lodo Activado de Aireación Extendida (LAE): alta edad del lodo y baja relación F/M (Sperling, 2007b).

El afluente que ingresa a un sistema de lodos activados, debe contar con algún tratamiento físico previo. El agua que ingresa a un sistema LAC, será aquella posterior a un tanque de sedimentación primario; mientras que para un sistema LAE, éste puede recibir las aguas directamente de un pretratamiento (Sperling, 2007b).

Una planta de LAC, según Sperling (2007b), está constituida por las siguientes cuatro partes básicas:

- **Tanque de aireación (reactor):** es el tanque donde la biomasa se encuentra suspendida en el agua residual y donde se les proporciona oxígeno mediante un equipo de aireación (difusor de aire) que provee suficiente turbulencia para evitar que los sólidos sedimenten.
- **Clarificador (sedimentador):** es donde se realiza la separación de los sólidos (lodos) y líquidos por medio de la decantación y floculación. Por lo general, esta unidad tiene forma de cono invertido.

- **Línea de retorno de lodos:** es la tubería que se conecta del sedimentador secundario al tanque de aireación para recircular los lodos, con el objetivo de mantener una alta concentración de biomasa en el tanque, lo que contribuye a la eficiencia del sistema.
- **Línea de exceso de lodos:** es la tubería con la que se retira (drena) el lodo en exceso, de manera que se mantenga una concentración adecuada de biomasa en el reactor. El lodo retirado (llamado también biosólido) debe ser dirigido a una línea de tratamiento de lodos.

La Figura 4 muestra un esquema típico de un sistema de LAC, el cual es un conjunto de procesos que dependen entre sí de manera integral. Si alguna de las partes del sistema falla, todo el sistema fallará (Jördening y Winter, 2005).

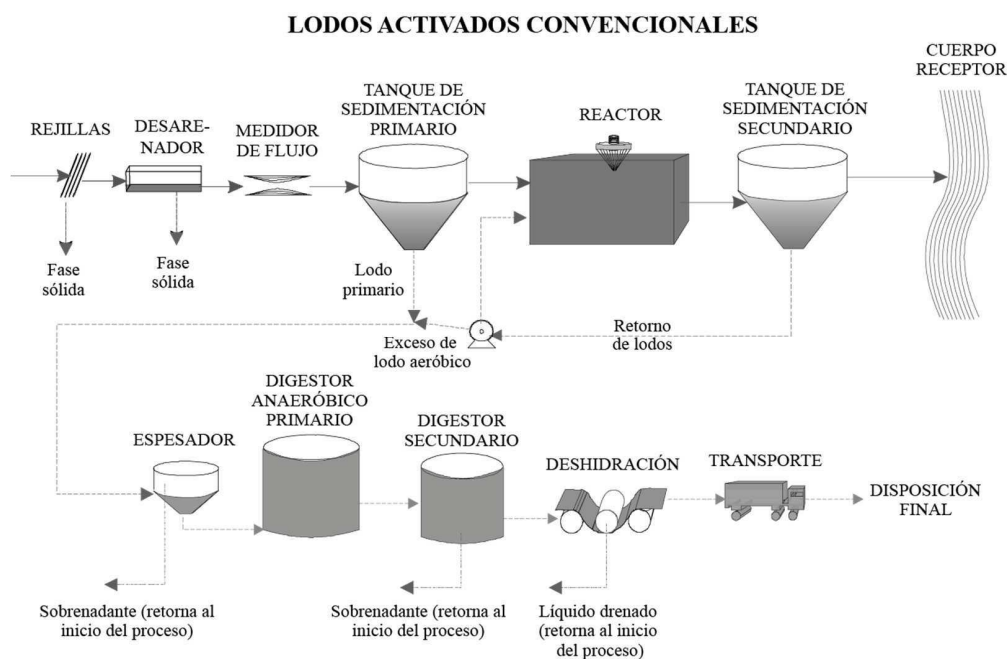


Figura 4. Diagrama de flujo típico de un sistema LAC y tratamiento de lodos.

Fuente: Adaptado de Sperling, 2007b.

2.2.2 Parámetros de diseño de la tecnología de LAC

- **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)**

El TRH es el tiempo promedio teórico que permanecen las partículas de líquido en un proceso de tratamiento. En comparación con otros STAR (por ejemplo, lagunas facultativas), en los sistemas de lodos activados este parámetro es más corto (en el orden de horas), lo que implica que el volumen del tanque de aireación es menor. Para los sistemas LAC, el TRH comúnmente es de 6 h a 8 h (Sperling, 2007b).

- **Tiempo de Retención del Sólido (TRS) o edad del lodo (θ_c)**

Debido a la recirculación de los lodos, éstos permanecen más tiempo en el sistema que la parte líquida, lo que se conoce como TRS o edad del lodo (θ_c) y se define como la relación entre el lodo activado presente en el reactor y el lodo en exceso que es retirado del sistema por día (Sperling, 2007b).

La edad del lodo está relacionada con: el volumen del reactor, la producción de sólidos, el consumo de oxígeno y otras variables operacionales. Comparado con los sistemas de LAE, los sistemas de LAC trabajan con bajas edades de lodos, aproximadamente de 4 a 10 días (Sperling, 2007b).

- **Relación Alimento/Microorganismos: F/M (Food/Microorganism)**

La relación entre la cantidad del alimento o la carga de sustrato DBO por día y la cantidad de microorganismos, expresados como sólidos suspendidos volátiles del licor de mezcla (LMSSV) por unidad de biomasa en el reactor, se conoce como la relación F/M (Food/Microorganism) y comúnmente se representa con las unidades de kg DBO/kg LMSSV-d. Este parámetro indica qué tanta oferta de biomasa hay disponible para los microorganismos, que pueda ser equilibrada con la capacidad de consumo de éstos. Valores altos de TRS están asociados con valores bajos de F/M, y viceversa (Sperling, 2007 b).

Generalmente, en los sistemas de LAC se tiene una relación F/M en el rango de 0,25 a 0,50 kg DBO/kg LMSSV-d (Sperling, 2007b).

2.2.3 Eficiencia en la remoción de contaminantes de la tecnología LAC

La eficiencia en la remoción de contaminantes mediante el tratamiento de las aguas residuales varía según las unidades de tratamiento que cuente un sistema. Según Sperling (2007a), para la tecnología de LAC y el tratamiento de aguas residuales domésticas, se tendrán las concentraciones y eficiencias que se muestran en el Cuadro 4 .

Cuadro 4. Concentraciones promedio de efluente y remoción típica en sistemas LAC para aguas residuales domésticas

Parámetro	Calidad del efluente	Eficiencia de remoción (%)
SST (mg/l)	20 a 40	87 a 93
DQO (mg/l)	45 a 120	80 a 90
DBO (mg/l)	15 a 40	85 a 93
Amoníaco (mg/l)	< 5	> 80
N Total (mg/l)	> 20	< 60
P Total (mg/l)	> 4	< 35
Coliformes Fecales (CFU/100 ml)	10^6 a 10^7	1 a 2 log*
Huevos de helmintos (huevos/l)	> 1	-
*: Unidades log, ver Cuadro 5.		

Fuente: Sperling, 2007a.

Cuadro 5. Eficiencias de remoción con unidades logarítmicas

Eficiencia de remoción	
Unidades log	Porcentaje (%)
1	90
2	99
3	99,9
4	99,99
5	99,999
6	99,9999
6	99,99999
7	99,999999
8	99,9999999

Fuente: Sperling, 2007a.

2.3. Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS)

2.3.1. Componentes y funcionamiento de la tecnología IFAS

La tecnología de Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada “IFAS” por sus siglas en inglés (Integrated Fixed-Film Activated Sludge), se encuentra clasificada como parte de los sistemas de tratamiento biológico integrado (o híbrido), pues utiliza un medio de soporte donde crece la biopelícula, inmerso en un tanque de crecimiento suspendido de microorganismos (tanque de lodos activados) (WEF et al., 2010).

Una biopelícula fija (*biofilm*) es una comunidad microbiana organizada, adherida a la superficie de un medio de soporte (biosoporte). Los biosoportes se encontrarán sumergidos en el tanque de aireación y los microorganismos de la biopelícula entrarán en contacto con el líquido, generalmente turbulento, y oxidarán (degradarán) la materia orgánica. Conforme la biopelícula crece ésta se va desprendiendo y posteriormente será eliminada en una unidad de

separación de sólidos, que podrá ser un tanque de sedimentación secundario, un sistema de Flotación por Aire Disuelto “DAF” (Por sus siglas en inglés: *Dissolved Air Flotation*), u otra unidad de clarificación (Asano et al., 2007).

La tecnología de IFAS reduce el área de construcción del tanque de aireación, en comparación con el área utilizada en la tecnología de lodos activados (en cualquiera de sus variantes: LAC o LAE), siendo una gran ventaja para el diseño de plantas de tratamiento nuevas, que cuentan con limitaciones de terreno. Lo anterior es posible debido al aporte adicional de área superficial que brindan los biosoportes que, al compararlo con un sistema de lodos activados, se tendrá una mayor concentración de biomasa en el tanque de aireación, sin modificar su volumen (Davis et al., 2009).

Al aplicar la tecnología de IFAS a sistemas de lodos activados ya construidos, es posible ampliar la capacidad del tratamiento y/o aumentar la eliminación biológica de nutrientes en el efluente, en ambos casos, sin modificar la huella constructiva, aspecto muy importante para sistemas cuya capacidad está cerca del límite o ya está excedida (Davis et al., 2009).

La aplicación de la tecnología IFAS en sistemas municipales existentes, es una solución muy rentable, pues no requiere amplias modificaciones tanto en la extensión de la PTAR, utilización de la infraestructura y equipos existentes, así como el conocimiento previo de los operadores en el proceso, el entrenamiento y las habilidades (Headworks Bio Inc., 2014a).

También, la tecnología IFAS puede mejorar las tasas de nitrificación y llevar a cabo desnitrificación en el tanque de aireación (al tener zonas anóxicas en las partes profundas de las biopelículas).

2.3.2. Configuraciones de los sistemas IFAS

Una configuración típica de un sistema IFAS consiste en una sección de pretratamiento, un tanque de aireación tipo IFAS -con biosoportes-, un tanque de aireación de tipo lodos activados convencional -sin biosoportes- (esta unidad es opcional, dependiendo del diseño), un clarificador final y una línea de recirculación de lodos que descargue los lodos de retorno a la entrada (aguas arriba) del sistema con biosoportes (Figura 5). Esta configuración tendrá como objetivo la remoción de la materia orgánica. Si se desea realizar tratamiento de nutrientes (nitrificación y desnitrificación), una posible configuración sería colocando el

tanque con biosoportes posterior al tanque de aireación (Davis et al., 2009).

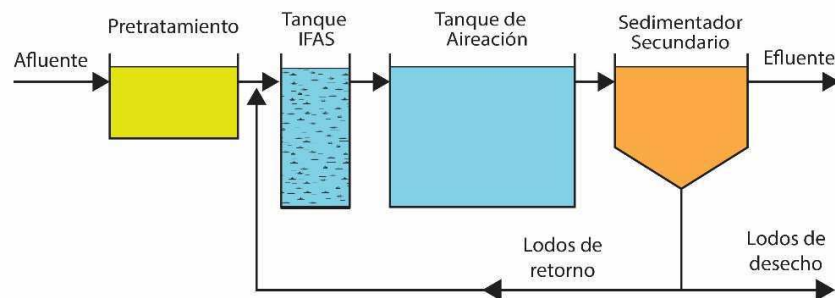


Figura 5. Diagrama esquemático para un sistema IFAS

Fuente: Adaptado de Davis et al., 2009.

Otra configuración de estos sistemas es el reactor de biopelícula fija sobre lecho móvil, conocido como “MBBR” por sus siglas en inglés (*Moving Bed Bioreactor System*). Este sistema difiere del IFAS en que la recirculación de lodos no es indispensable, y en caso que ésta se aplicara, el punto de alimentación de los lodos de retorno estaría ubicado posterior (aguas abajo) del sistema de biosoportes (Figura 6) (Davis et al., 2009).

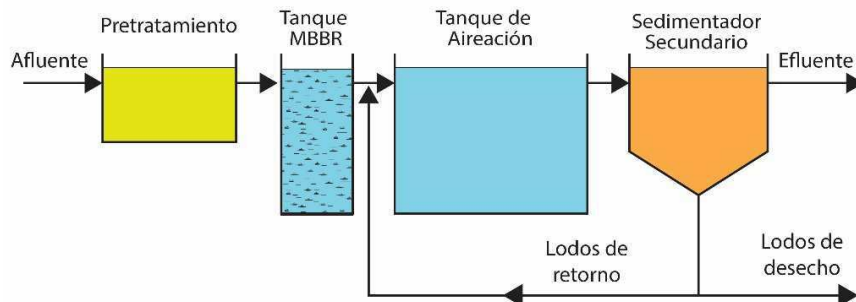


Figura 6. Diagrama esquemático de un sistema MBBR

Fuente: Adaptado de Davis et al., 2009.

La recirculación de lodos en la tecnología IFAS, ingresa directamente al tanque que contiene los biosoportes, lo que indica que el sistema IFAS tiene más microorganismos disponibles (biomasa) para consumir los constituyentes orgánicos del agua residual, superando la capacidad de remoción de carga orgánica que la de un sistema MBBR. Así mismo, el sistema IFAS tiene mayor capacidad para soportar picos de cargas hidráulicas que los sistemas MBBR y que los sistemas de lodos activados (Davis et al., 2009).

Debido a la complejidad del proceso IFAS y las dificultades para comprender el área y la

actividad de las biopelículas, los diseños de estos procesos son empíricos y están basados en plantas piloto o modelos a escala limitados (Asano et al., 2007).

2.3.3. Tipos de medios soportantes (biosoportres)

Los biosoportres son medios inertes colocados en los tanques de aireación para soportar el crecimiento de la biomasa en su superficie (Davis et al., 2009). Adicionalmente, actúan como dispositivos de corte que interceptan las burbujas de aire gruesas (o medias) y las dividen en burbujas más pequeñas, para maximizar la transferencia de oxígeno en el tanque de aireación (Pehrson y McDowell, 2002).

Existen diferentes configuraciones y tipos de biosoportres, éstos pueden ser: (a) medios móviles y (b) medios fijos. Los sistemas con medios móviles (o dispersos) se les conoce también como sistemas de “lecho móvil”, pues los biosoportres se encuentran en movimiento, manteniéndose suspendidos (flotando) en el tanque por la acción de los aireadores (generalmente de burbuja media o gruesa). Los materiales más utilizados para fabricar medios móviles son: esponja, fibra de vidrio, polietileno de alta densidad “PEAD” (*HDPE: High-Density Polyethylene*), materiales sintéticos, entre otros. Los biosoportres, al estar en circulación constante, chocarán entre ellos repetidamente, lo que facilitará el desprendimiento de la biopelícula madura para su renovación. Lo anterior es más efectivo en el caso de los materiales rígidos (como los de polietileno) (Angappan, 2014).

La Figura 7 muestra los biosoportres de PEAD suspendidos en el tanque de aireación de la PTAR El Roble (Puntarenas).



Figura 7. Sistema IFAS con biosoportres móviles de polietileno (“carriers”) en la PTAR El Roble.

Fuente: Solano, 2014.

Los sistemas con medios fijos tienen los bioportos inmóviles, sujetos mediante una estructura al tanque de aireación. La biomasa que crece se mantiene en el bioporte, y se desprende únicamente por efecto de la aireación, provocando algunas veces obstrucciones. Los bioportos fijos disponibles en el mercado son de mayas tejidas, estructuras tipo láminas de PVC, entre otras (Pehrson y McDowell, 2002) (Figura 8).



Figura 8. Sistema IFAS con bioportos fijos de PVC.
Fuente: Brentwood Industries Inc., 2009.

El Cuadro 6 sintetiza las ventajas y las desventajas de diferentes tipos de bioportos.

Cuadro 6. Resumen comparativo de ventajas y desventajas de diferentes tipos de biosoportes.

Tipo de biosoportes	Biosoportes móviles		Biosoportes fijos	
	Polietileno (plásticos) 	Esponjas 	Maya tejida 	Hojas de PVC 
Ventajas	▪ Excelente mezclado ▪ Alta área superficial ▪ Fácil de operar ▪ Bajos costos de operación durante el ciclo de vida.	▪ Excelente mezclado. ▪ Alta área superficial.	▪ Fácil de instalar. ▪ No hay pérdida de material.	▪ Fácil de instalar. ▪ Alto rendimiento. ▪ No hay pérdida de material. ▪ Bajos costos iniciales.
Desventajas	▪ Mayores dificultades para darle mantenimiento a los sistemas de aireación. ▪ Requieren equipo adicional (pantallas) para retención de los biosoportes en el tanque de aireación.	▪ Pérdida de superficie (por abrasión o lavado). ▪ Dificultad para desprender la biomasa madura de los biosoportes. ▪ Problemas de obstrucción de los poros por parte de la biomasa. ▪ Requieren reemplazo periódicamente. ▪ Obstrucción de los dispositivos de aireación y las pantallas por taponamiento. ▪ Mayores dificultades para darle mantenimiento a los sistemas de aireación. ▪ Requieren equipo adicional para retención de los biosoportes en el tanque de aireación.	▪ Propenso al afloramiento de lombrices. ▪ Puede tener problemas de ensuciamiento y obstrucción si no se remueven adecuadamente los materiales fibrosos.	▪ Mayores dificultades para mantenimiento y limpieza de los biosoportes. ▪ Puede tener problemas de ensuciamiento si no se remueven adecuadamente los restos de fibras.

Fuente: Adaptado de Brentwood Industries, 2009 y Headworks Bio Inc., 2014.

3.3.1 Biosoportes “ActiveCell” de la marca Headworks Bio Inc.

La empresa Headworks Bio Inc. cuenta con más de 15 años de experiencia en las tecnologías de MBBR e IFAS. Han realizado investigaciones y determinado casos particulares de estudio, por lo que conocen el proceso que llevan a cabo los biosoportes dentro de los sistemas de tratamiento, esto les ha permitido diseñar medios de soporte cada vez más eficientes. Actualmente Headworks Bio Inc. tiene a disposición en el mercado diferentes modelos de biosoportes plásticos diseñados y fabricados por ellos mismos, llamados comercialmente “ActiveCell (AC)”, los cuales son de PEAD virgen (Figura 9).

Biosoporte	Área superficial efectiva (m ² /m ³)	Área Total (m ² /m ³)	Peso (kg/m ³)	Lado (mm)	Diámetro (mm)	Ancho (mm)	Gravedad Específica	Material
 AC 920	680	920	146	13	-	13	0,94-0,98	PEAD
 AC 700	550	700	105	-	22	8		
 AC 515	485	515	142	-	22	16		
 AC 450	402	450	120	-	21	16		

Figura 9. Variedad de biosportes ActiveCell de Headworks Bio Inc.
Fuente: Adaptado Headworks Bio Inc., 2014.

El biosoporte ActiveCell 920 es recomendado para el tratamiento de aguas residuales municipales y domésticas. Sus aberturas están optimizadas para altas concentraciones de biomasa, sin tener problemas de obstrucciones. Existen otros medios de soporte disponibles en el mercado, con la misma área superficial efectiva (m²/m³) pero con aberturas más pequeñas; las cuales, bajo cargas máximas, son potenciales sitios de obstrucciones (Headworks Bio Inc., 2014a).

Su forma -similar a un cubo- favorece a un menor arrastre de la dinámica de fluidos, así mismo, al ser cúbico tiene una alta densidad de empaquetamiento (mayor cantidad de piezas pueden ser empacadas en determinado volumen), lo que resulta en una mayor área superficial por unidad de volumen (Headworks Bio Inc., 2014).

2.3.4. Consideraciones del diseño y recomendaciones operativas de la tecnología IFAS

- **Pretratamiento y tratamiento primario:** Todos los sistemas IFAS requieren de un adecuado tratamiento preliminar, el cual debe contar con rejillas finas, mínimo 6 mm de separación (WEF, 2011) y sedimentación primaria, para prevenir atascos por materiales fibrosos y la acumulación de materiales gruesos en los biosportes o en las pantallas

retenedoras (Brentwood Industries, 2009).

- **Aireación y mezclado:** Debe proveerse suficiente oxígeno en los tanques de IFAS, tanto para satisfacer la demanda requerida para la respiración de los microorganismos, como para lograr una apropiada mezcla y garantizar la suspensión de los biosoportres y el licor de mezcla en el reactor (Headworks Bio Inc., 2014a). Se debe evaluar la capacidad de aireación de los equipos (sopladores) en los sistemas LAC existentes, que se van a modificar a sistema de IFAS, para determinar si el aporte de oxígeno será suficiente para cumplir con las necesidades metabólicas de los microorganismos en el nuevo sistema a implementar (Pehrson y McDowell, 2002).
- **Difusores de aire:** Se recomienda utilizar sistemas de aireación de burbuja media para los biorreactores IFAS. Este tamaño de burbuja se logra por medio de sistemas de tuberías de acero inoxidable con pequeños poros perforados, los cuales proveen suficiente energía para el mezclado, así como un adecuado nivel de transferencia de oxígeno por el tamaño intermedio de la burbuja (WEF, 2011). Además, estos sistemas requieren menos mantenimiento que en el caso de utilización de difusores.
- **Área superficial efectiva:** La cantidad de biomasa será directamente proporcional al área superficial del biosoporte, pues es el área disponible para el establecimiento de la biopelícula, por lo tanto, ésta es el área efectiva a utilizar en el diseño del sistema. En el caso de los medios móviles, el área superficial efectiva puede ser mucho más alta que en los medios fijos (Brentwood Industries, 2009).
- **Vida útil de los biosoportres:** Generalmente los tanques IFAS están al aire libre y los biosoportres están expuestos a la radiación solar durante toda su vida útil. Para evitar su rápida degradación se recomienda que el material de los biosoportres tenga protección contra los rayos ultravioleta (inhibición UV) (WEF, 2011). Según la empresa Headworks Bio Inc., los biosoportres diseñados y fabricados por ellos, al ser de material virgen (HDPE) y tener protección UV, soportan muchos años de desgaste. Indican que existen plantas hasta con 20 años de utilizar los biosoportres originales, por lo que garantizan medios soportantes con una vida útil de 20 años (Headworks Bio Inc., 2014a).
- **Condición sumergida de los biosoportres:** Los biosoportres se deben encontrar siempre sumergidos bajo el agua residual, pues al encontrarse sobre el nivel del agua y estar expuestos

al aire, se producirán problemas de malos olores (WEF, 2011).

- **Pantallas retenedoras:** Los sistemas IFAS de lecho móvil, deben contar con pantallas (planas y cilíndricas) para retener los biosoportes (en los biorreactores IFAS), del agua residual que se dirige hacia las siguientes fases (Pehrson y McDowell, 2002). Estas pantallas deben ser diseñadas con suficiente área para minimizar las pérdidas de carga hidráulica en los tanques (WEF, 2011).
- **Perfil hidráulico y volumen desplazado:** Se debe tomar en cuenta que los biosoportes desplazan un determinado volumen de los tanques de aireación, lo que también repercute en el TRH. Según estudios, se recomienda que los biosoportes móviles ocupen máximo el 70% del volumen del reactor, pues a porcentajes mayores, la eficiencia en el mezclado decrece (Weiss et al., 2005).
- **Puesta en marcha del sistema:** Durante la puesta en marcha de un sistema IFAS, los biosoportes tienden a flotar en la superficie del agua residual. Para lograr que los biosoportes se mantengan sumergidos, se debe aplicar mayor cantidad de flujo de aire, y una vez que los biosoportes se restablecen, se reduce la cantidad de aire. El sistema puede durar de 2 a 4 semanas mientras se va formando la biopelícula y se estabilicen los biosoportes en el licor de mezcla. Es común que se presenten problemas de excesiva espuma durante la puesta en marcha. Para reducir esto, se suele utilizar químicos anti-espumas para mitigarlo. Este problema se elimina una vez se establezca la microbiología en los biosoportes (WEF, 2011).

2.4. Biorreactores de Membrana (MBR)

2.4.1. Componentes y funcionamiento del sistema MBR

Una membrana (semipermeable) es una lámina fina de un determinado material que separa sustancias en función de sus propiedades (físicas y químicas) mediante la aplicación de una fuerza o presión dirigida hacia ella (AWWA Research Foundation et al., 1998).

El MBR es una tecnología revolucionaria, que combina el crecimiento suspendido de microorganismos de los sistemas de lodos activados, con el uso de membranas como equipo de filtración, cuya función es separar los sólidos de los líquidos usando baja presión, ya sea con microfiltración o ultrafiltración (WEF et al., 2010). El producto filtrado se le conoce

como “permeado”, mientras que las sustancias rechazadas forman el concentrado conocido como “retenido” (Yang, 2013).

La microfiltración (MF) puede definirse como una operación de clarificación por medio de una membrana con poros de tamaño entre 0,1 µm a 10 µm que rechaza solutos gruesos (macromoléculas). La ultrafiltración (UF) además de clarificar, también realiza desinfección, pues su membrana porosa tiene de 0,01 µm a 0,1 µm con lo que es posible rechazar microorganismos (virus, bacterias) y otros tipos de partículas (Figura 10). Ambos casos aplican presiones bajas (AWWA et al., 1998) (WEF et al., 2010).

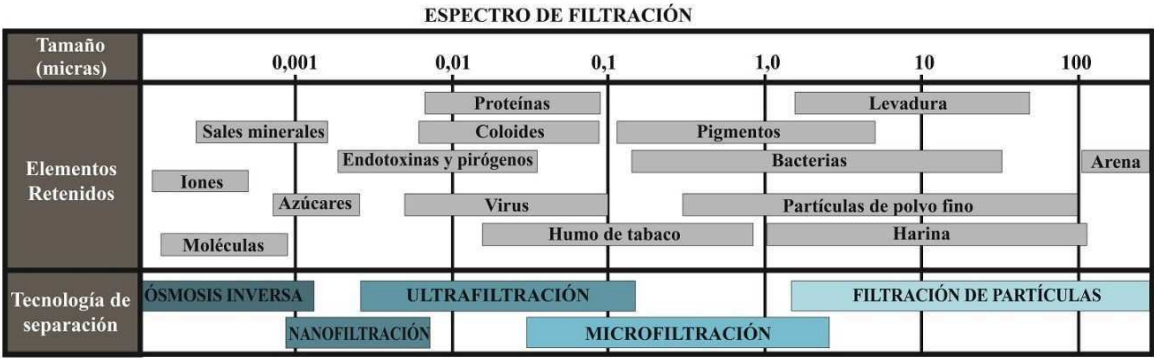


Figura 10. Potencial de retención de acuerdo al tamaño de partículas
Fuente: Adaptado de Ravagnan S.p.A., 2016.

Debido a la alta capacidad de filtración, los sistemas de MBR no requieren sedimentador secundario. Comparados con un sistema de LAC, son sistemas muy compactos que requieren menor tamaño de infraestructura, reduciendo considerablemente su huella de construcción (Hai et al., 2014).

Además de los componentes típicos de un sistema de LAC, en un sistema MBR se deben agregar: rejillas finas y los elementos correspondientes a las membranas según su configuración (sopladores para la limpieza, bombas para extraer el permeado, sistema de limpieza para retrolavado, entre otros) (Hai et al., 2014). La Figura 11 se muestra un esquema de los componentes típicos de un sistema de MBR.

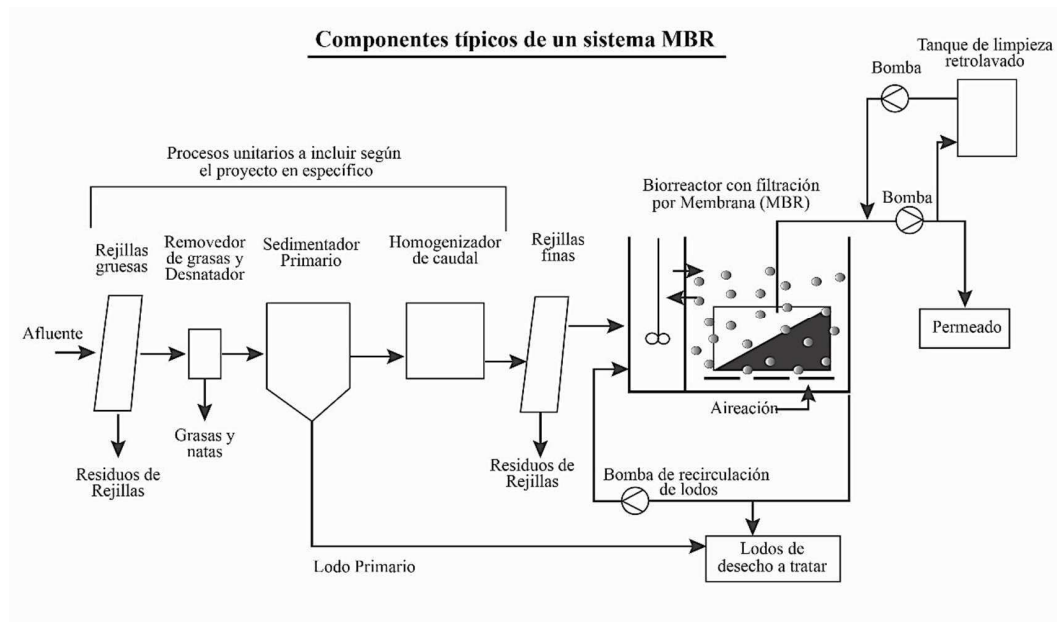


Figura 11. Componentes típicos de un sistema de MBR.

Fuente: Modificado de Hai et al., 2014.

Los sistemas de MBR pueden utilizarse tanto en tratamientos aeróbicos como anaeróbicos, para separar el agua tratada de la biomasa activa (Tchobanoglous et al., 2004).

Las membranas durante su funcionamiento, se someten a un vacío que extrae el agua a través de ellas, mientras quedan retenidos los sólidos en el biorreactor. Se introduce aire comprimido a través de la base del módulo (tanque) para mantener la concentración de SST dentro del reactor, y a la vez limpiar el exterior de las membranas. Conforme las burbujas de aire suben a la superficie, se da la limpieza de las membranas, este aire a la vez proporciona oxígeno para mantener las condiciones aeróbicas en el tanque (Yang, 2013).

Generalmente, el sistema de membranas está configurado en estructuras compactas llamadas módulos o *cassettes* (Figura 12). Los módulos son diseñados para proveer fuerza mecánica, soporte y facilitar las limpiezas de las membranas. También, permiten reducir el espacio, agrupando una amplia área superficial (Tchobanoglous et al., 2004).

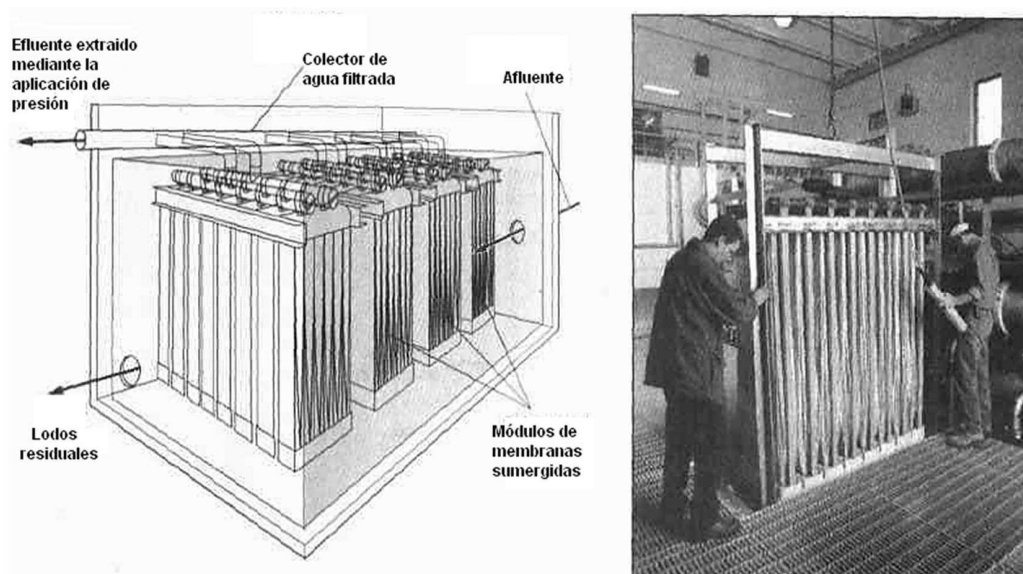


Figura 12. *Izquierda:* Esquema de módulos de membranas para un sMBR. *Derecha:* Módulos de membranas antes de ser colocado al sMBR.

Fuente: Adaptado de Tchobanoglous et al., 2004.

2.4.2. Configuraciones de los sistemas MBR

Existen variantes en la configuración de los sistemas MBR, las cuales se describen a continuación:

2.4.2.1. MBR con membrana externa (eMBR) “side-stream MBR”: sistema impulsado por presión, donde las tuberías y las membranas están colocadas externamente al reactor biológico. Generalmente, se da la recirculación del material retenido (Figura 13.a). Los sistemas eMBR son más propensos a ensuciarse pues operan con flujos altos, lo que implica menor permeabilidad, pues el ensuciamiento crece con el incremento en el flujo (Judd, 2006).

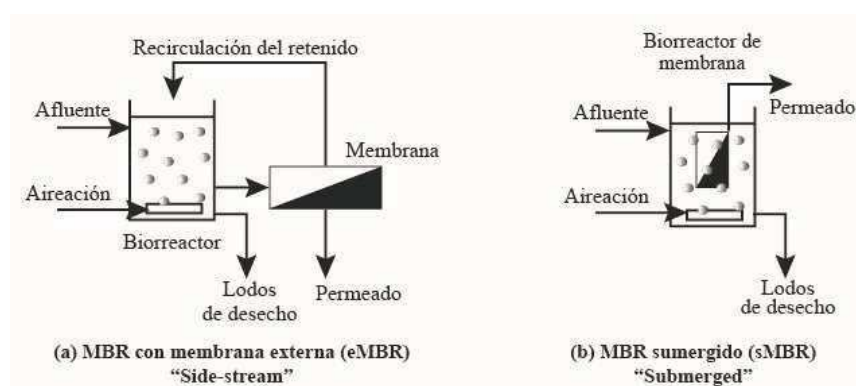


Figura 13. Configuraciones principales de los sistemas MBR.

Fuente: Adaptado de Judd, 2006.

2.4.2.2. MBR con membrana sumergida o inmersa (sMBR) “submerged MBR”:

sistema impulsado al vacío, donde las membranas están inmersas (sumergidas) en un reactor con el licor de mezcla (Tchobanoglous et al., 2004) por lo que la membrana debe ser diseñada con el reactor (Water Environment Federation et al., 2010). Es común en estos sistemas que el reactor cuente con compartimientos o tanques previos, esto para minimizar los esfuerzos de limpieza de las membranas (Yang, 2013) (Figura 13.b).

Los sistemas sMBR pueden ser sumergidos internos (i-sMBR) o sumergidos externos (e-sMBR). Los i-sMBR son aquellos cuyas membranas se encuentran directamente inmersas en el reactor de lodos activados (biorreactor) (Figura 14.a), mientras que en el e-sMBR el licor de mezcla del biorreactor es bombeado a un módulo de filtración aparte, donde se encuentra el sistema de membranas sumergido (Figura 14.b) (Hai et al., 2014). El afluente de los sistemas i-sMBR debe tener una adecuada filtrabilidad, y se requiere mayor área de membrana que para los sistemas e-sMBR. Una gran ventaja es que éstos consumen menos energía, pues no requieren un bombeo extra para trasladar (recircular) el licor de mezcla a otro tanque.

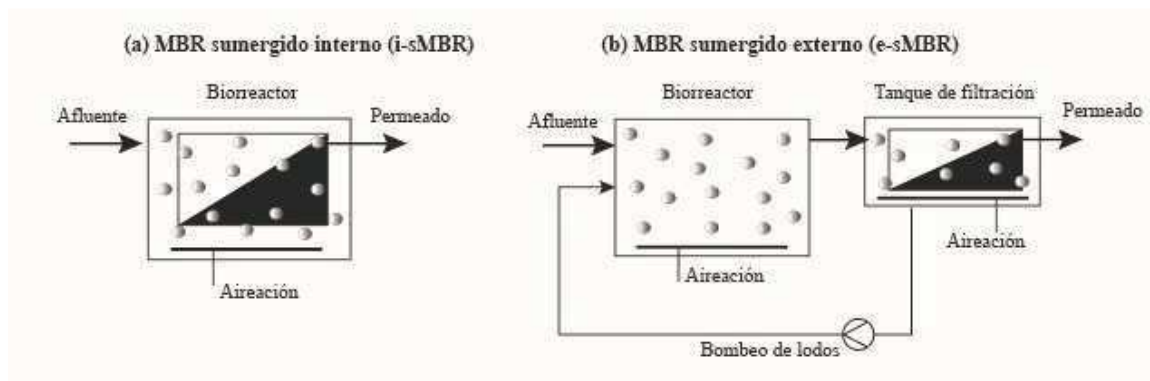


Figura 14. Configuraciones de los sistemas sMBR (a) interno (i-sMBR) (b) externo (e-sMBR)

Fuente: Hai et al., 2014.

La tecnología de membranas sumergidas (sMBR) es la más utilizada a nivel general, pues opera a presiones más bajas (menores a 50 kPa) que el de membrana externa (eMBR). Las PTARs municipales utilizan comúnmente los sMBR (Melin et al., 2005). Los sistemas sMBR tienden a ser más costo-efectivos en PTARs a gran escala, mientras que los sistemas eMBR favorecen a los sistemas de escala pequeña (Hai et al., 2014). Específicamente los sistemas sMBR aerobios con MF o UF, son los que actualmente desempeñan el papel más prominente entre los procesos de tratamiento de aguas residuales a gran escala (Hai et al., 2014).

2.4.3. Material de las membranas para MBR

Existen muchos materiales utilizados para fabricar las membranas, lo que se busca con éstos es que formen una fina capa superficial que proporcione la permeabilidad selectiva requerida, según el grosor del poro; además, debe ser mecánicamente fuerte (con integridad estructural) que le permita resistir diferentes condiciones de temperatura, ataques químicos, pH, etc. (Yang, 2013 y Judd, 2006).

Los materiales que se utilizan para membranas se pueden clasificar en: orgánicos (polímeros) e inorgánicos (cerámica, metal, vidrio, etc.). En los sistemas MBR, las más utilizadas son las de polímeros y las cerámicas. Una membrana clásica cuenta con una estructura molecular anisotrópica, lo que indica que presenta diferentes características según la dirección en que se analiza (Judd, 2006). La Figura 15 muestra dos secciones transversales de membranas de ultrafiltración, (a) de polímero y (b) de cerámica, ambas vistas en microscopio, en las cuales se observa su anisotropía.

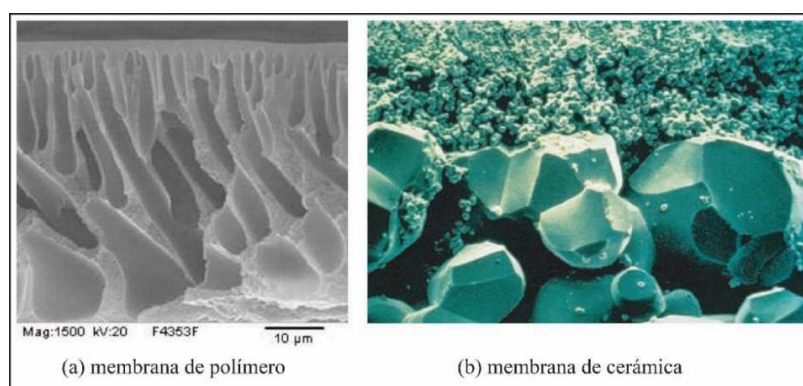


Figura 15. Secciones transversales de diferentes materiales de membranas de UF: (a) polímero y (b) cerámica
Fuente: Adaptado de Yang, 2013 y Judd, 2006.

De la gran variedad de polímeros, los más frecuentes en la fabricación de membranas para el tratamiento de aguas residuales son las de difluoruro de polivinilideno (PVDF), polietilsulfonas (PES), polietileno y sus derivados (PE) y polipropileno (PP). Generalmente se busca que las membranas sean *hidrofílicas* (con afinidad por el agua) para evitar que la membrana se ensucie muy rápido. En el caso de los materiales *hidrofóbicos* (no compatibles con el agua) como PVDF, PE y PP, se les aplica un tratamiento químico especial (como la oxidación química, reacción química orgánica, tratamiento de plasma, entre otros) para que la superficie de la membrana sea *hidrofílica* (Arévalo, 2011) (Yang, 2013).

Las membranas de los materiales cerámicos (como óxidos, nitruros o carburos de metales: aluminio, zirconio o titanio), minerales derivados de arcillas, materiales metálicos y de vidrio, poseen mayor estabilidad química, mecánica y térmica que los polímeros. Sin embargo, son más frágiles y costosas. Su uso se da principalmente en procesos industriales químicos, esterilización, tratamientos agresivos de líquidos y no son muy comunes en sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales (Arévalo, 2011).

2.4.4. Tipo de membranas para la tecnología MBR

Dependiendo de la geometría de una membrana, su forma y orientación con respecto a la dirección del flujo del agua, así varían las diferentes configuraciones, que definen las características de diseño y funcionamiento para cada sistema en específico (Arévalo, 2011).

Existen tres principales configuraciones de membranas aplicables a los sistemas MBR, las cuales se clasifican según su geometría, si es plana o cilíndrica, en: hoja plana (*Flat Sheet: FS*), fibra hueca (*Hollow Fiber: HF*) y multitubo (*Multitube: MT*) (Judd, 2006).

a) Hoja plana: Las membranas de hoja plana tienen una configuración tipo panel vertical, compuesto por dos hojas sujetadas a un marco, separadas entre sí una distancia entre 6 mm y 7 mm, formando un “sándwich” con un espacio en medio donde se crea el canal de alimentación (Hai et al., 2014). El conjunto de paneles forma un módulo, generalmente de forma cúbica o prismática, donde el lodo activado circula. Mediante succión al vacío, el material atraviesa la membrana de afuera hacia adentro y el líquido permeado es recolectado por unas tuberías que se encuentran sobre la placa, quedando retenidos los sólidos en su superficie (Figura 16) (Yang, 2013).

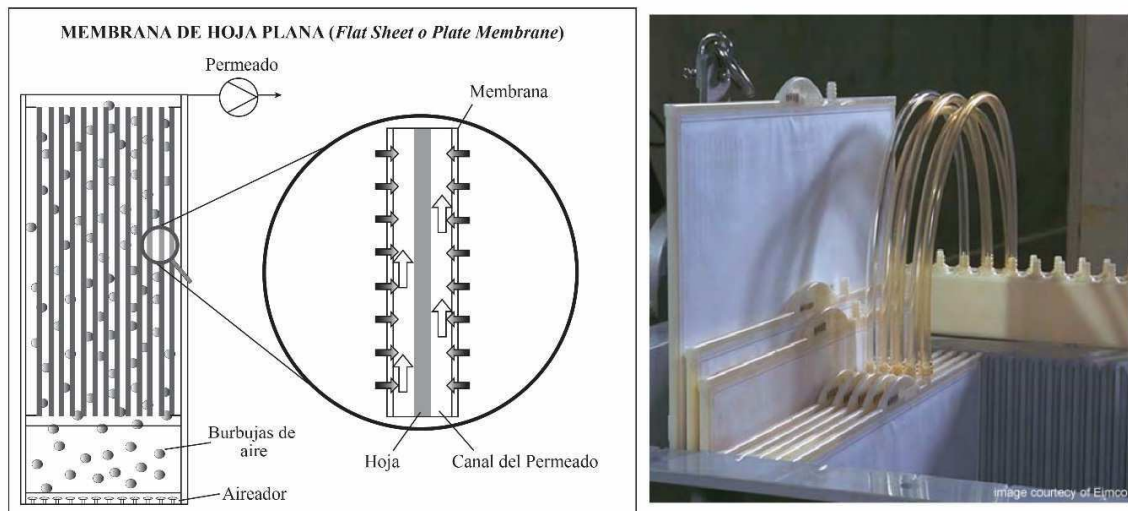


Figura 16. *Izquierda:* Esquema de membrana hoja plana. *Derecha:* fotografía de membrana tipo hoja plana.
Fuente: *Izquierda:* Adaptado de Yang, 2013. *Derecha:* Yang, 2013.

b) Fibra hueca: Fibras finas y alargadas, de un diámetro externo de 2 mm a 3 mm, unidas en sus extremos mediante un armazón (Hai et al., 2014). El conjunto de fibras huecas forma un módulo. El lodo activado rodea las fibras circulando por el espacio entre ellas, filtrándose el agua por succión de afuera de la fibra hacia adentro, reteniendo los sólidos en la superficie exterior de la membrana (Figura 17). Su configuración puede ser horizontal o vertical (Yang, 2013).

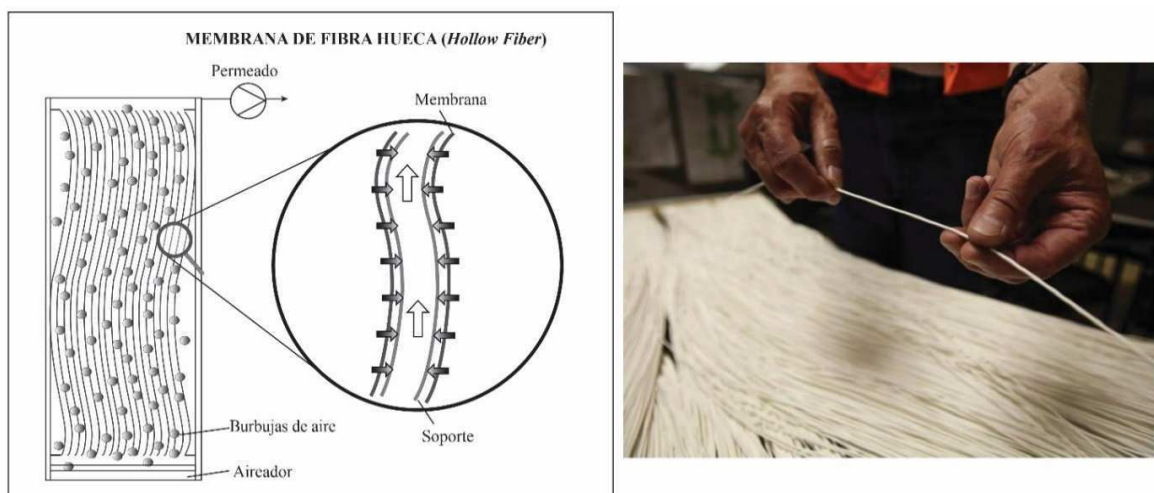


Figura 17. *Izquierda:* Esquema de membrana fibra hueca. *Derecha:* fotografía de membrana tipo fibra hueca.
Fuente: *Izquierda:* Adaptado de Yang, 2013. *Derecha:* Yang, 2013.

c) Multitubo: Módulo compuesto por recipientes cilíndricos que contienen microtubos o cavidades internas. Este tipo de membrana es utilizado predominantemente en sistemas de MBR externos eMBR (*Side-stream MBR*). El lodo activado es bombeado desde el biorreactor y circula a presión, forzando el paso del agua desde dentro del tubo hacia afuera. El agua permeada es bombeada al exterior, mientras los sólidos son retenidos (Figura 18). Su configuración puede ser horizontal o vertical (Yang, 2013).

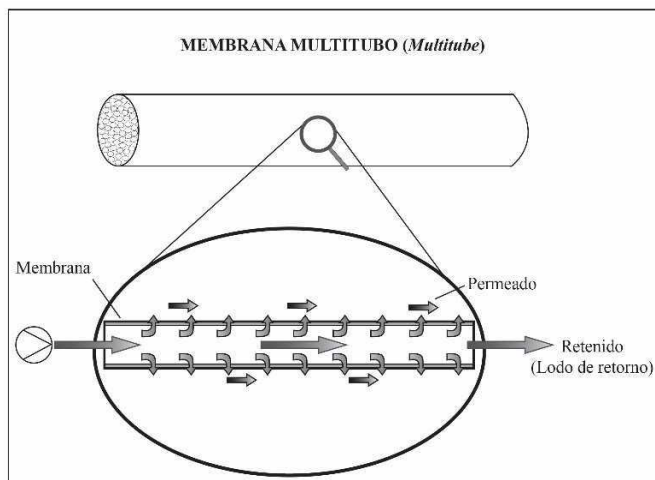
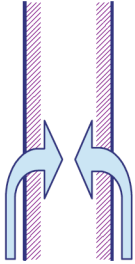
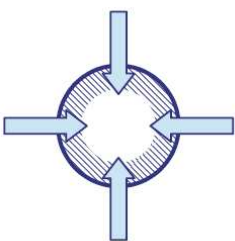
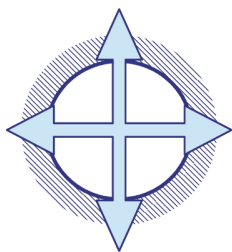


Figura 18. *Izquierda:* Esquema de membrana multitubo. *Derecha:* Fotografía de membrana tipo multitubo.
Fuente: *Izquierda:* Adaptado de Yang, 2013. *Derecha:* Hai et al., 2014.

El Cuadro 7 resume las características principales de las tres configuraciones de membranas más comunes, descritas anteriormente.

Cuadro 7. Características principales de las tres configuraciones de membranas más comunes.

Configuración	a) Hoja Plana	b) Fibra Hueca	c) Multitubo
Ejemplo			
Configuración MBR más común	iMBR	iMBR	eMBR
Movimiento del flujo a través de la membrana (Vista superior de las membranas)			
Flujo de operación (Flux permeado)	Moderado - Alto	Alto	Alto
Costo inicial	Moderado - Alto	Bajo - Moderado	Alto - Muy alto
Consumo energético	Moderado - Alto	Bajo - Moderado	Alto - Muy alto
Promueve la turbulencia	Buena (Generalmente tiene buena capacidad de agitación por turbulencia de aire)	Muy baja - Elevada (Depende de la empaquetadura y la aireación suministrada)	Muy buena
Facilidad de limpieza	Difícil (el retrolavado es posible únicamente en unas membranas recientemente desarrolladas)	Moderadamente fácil (Sí es posible el retrolavado)	Fácil (Sí es posible el retrolavado)
Densidad de empaquetamiento (m ² /m ³)	Moderada (100 - 250)	Moderada (600 - 1200)	Baja (20 - 90)

Fuente: Recopilado de Judd, 2006; Arévalo, 2011; Yang, 2013 y Hai et al., 2014.

2.4.5. Parámetros de diseño de la tecnología MBR

2.4.5.1. Parámetros biológicos de diseño

El diseño del tratamiento biológico de un sistema de MBR es muy similar al sistema de LAC. La mayor diferencia radica en el valor de los parámetros de diseño, principalmente: valores

independientes para el Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) y para el Tiempo de Retención del Sólido (TRS), lo que proporciona una mayor flexibilidad en el control de los parámetros de operación (Hai et al., 2014). También, es común una alta concentración de LMSS con la consecuente baja relación F/M. Todo lo anterior facilita el desarrollo de microorganismos de lento crecimiento, capaces de remover los contaminantes de lenta biodegradación y de sustancias recalcitrantes presentes en el agua residual, lo que genera un efluente de muy buena calidad (Melin et al., 2005). A continuación, se detalla cada parámetro de diseño biológico:

- **Sólidos Suspendedos del Licor de Mezcla (LMSS):** Actualmente el valor óptimo se encuentra entre 8 g/l y 12 g/l, o incluso algunos sistemas están siendo diseñados con valores de 6 g/l (Yoon, 2011). Los valores excesivamente altos de SSLM (> 30 g/l) dificultan la limpieza de las membranas con aire “*air scour*” y a la vez aumentan las concentraciones de biopolímeros que impiden la transferencia de oxígeno, generando una filtración muy lenta dentro y fuera de la membrana (Yoon, 2011). Se recomienda que el diseño de la etapa de filtración (los módulos de membranas), se realice previo al diseño de la etapa de tratamiento biológico, esto pues la concentración de LMSS en las membranas y los requerimientos de tasas de recirculación, influyen directamente en el diseño del biorreactor (Hai et al., 2014).
- **Relación Alimento/Microorganismos (F/M):** Debido a los altos valores de SSLM, este parámetro se encuentra entre la mitad y la tercera parte de los valores utilizados en los sistemas de LAC. Por ejemplo, para sistemas municipales los valores de diseño comunes están entre 0,05 a 0,15 gDBO/gSSVLM/d y entre 0,1 a 0,3 gDQO/gSSVLM/d (Yoon, 2011).
- **Edad del lodo (TRS ó Θ_x):** Se recomienda que este valor sea elevado, de manera que permita una nitrificación completa, así favorece la filtración a través de las membranas. Según las casas comerciales TRS debe ser mayor a 9 días (Iglesias, 2014).
- **Caudal de recirculación (Qr):** Este caudal puede variar entre 1,5 a 5,0 veces el caudal de entrada al sistema, para mantener la alta concentración de LMSS (Iglesias, 2014). Es una relación mucho mayor que en los sistemas de LAC.

En el siguiente cuadro se presentan los valores típicos para el diseño biológico del tanque de membranas para sistemas municipales e industriales:

Cuadro 8. Parámetros biológicos de diseño típicos de un sistema MBR municipal e industrial

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valores de diseño	
			Sistemas municipales	Sistemas industriales
Concentración LMSS en el biorreactor	LMSS, X_{bio}	g/l	5 - 14 (sMBR)	<15 (sMBR) <30 (eMBR)
Tiempo de Retención del Sólido/Edad del lodo	TRS, Θ_x	d	10 - 35	5 ->50
Tiempo de Retención Hidráulico	TRH	h	> 3,6	-
Relación Alimento/Microorganismos	F/M	kg DBO/kg MLSS-d	> 0,05	-

Fuente: Adaptado de Hai et al., 2014; Iglesias, 2014 y Brepols, 2011.

Sistemas a gran escala generalmente cuentan con compartimentos o biorreactores en cascada con varios ciclos de biomasa y de retorno de lodos (Hai et al., 2014).

2.4.5.2. Parámetros de diseño para etapa de filtración

Para el diseño y la operación específicamente de las membranas, los parámetros directamente relacionados con el proceso de filtración son:

- **Flujo permeado (J):** Es el volumen de líquido que pasa a través del área de membrana, por unidad de tiempo, a caudal promedio. La unidad en el SI es de metros cúbicos por metro cuadrado de membrana por segundo ($m^3/m^2_{membr} \cdot s$); sin embargo, la unidad más común es LMH ($l/m^2 \cdot h$) (Yang, 2013). Otras unidades utilizadas son: $m^3/m^2 \cdot h$, GFD ($gal/ft^2 \cdot d$), m/s (refiriéndose a la velocidad de permeado) (Hai et al., 2014). El flujo permeado determina la superficie de membrana necesaria, independientemente de la concentración en el reactor (Iglesias, 2014).
- **Presión transmembrana (PTM o ΔP):** es la presión diferencial que se crea entre un lado y el otro de la membrana durante la filtración. Este es el parámetro clave en el control del funcionamiento de los MBR (Iglesias, 2014). Su unidad en el SI es el Pa (pascal), sin embargo, también se utiliza la unidad bar o la unidad inglesa psi (“pound-force per square inch” = libra-fuerza por pulgada cuadrada) (Hai et al., 2014).
- **Permeabilidad (P):** es el resultado de dividir el flujo permeado J entre la PTM (Hai et al., 2014).
- **Resistencia de la membrana (R):** Es la resistencia que opone la membrana al paso de un fluido. Depende del material, el tamaño del poro, grosor, etc. Este concepto es inverso de la permeabilidad (Iglesias, 2014).

- **Demanda de aire según la superficie de las membranas (SAD_m):** Es la cantidad de aire necesaria para la aireación de las membranas y depende del área superficial de la membrana. Las unidades del SI utilizadas son $m^3 \text{ aire}/m^2_{(\text{de membrana})} \cdot \text{hora}$. Normalmente es un dato suministrado por los proveedores de las membranas, pues varía en función de la configuración del sistema y del tipo de membrana (Iglesias, 2014).

El Cuadro 9 muestra los rangos típicos de parámetros para el diseño preliminar del sistema de filtración. Estos valores deben ser tomados como orientativos, ya que las diferentes casas comerciales están continuamente distribuyendo en el mercado nuevos modelos optimizados que operan con diferentes parámetros de diseño (Iglesias, 2014).

Cuadro 9. Valores típicos para el diseño de membranas en un sistema SBR.

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valores de diseño
Flujo por área superficial	$J_{\text{net, diseño}}$	$LMH = l/(m^2 \cdot h)$	15 - 35
Presión Transmembrana	PTM o ΔP	bar	0,1 - 0,5
Demanda de aire específica según superficie de membrana	SAD_m	$Nm^3/(m^2 \cdot h)$	0,3 - 1,5

Fuente: Adaptado de Hai et al. 2014, e Iglesias 2014.

El aspecto más importante es identificar un flujo de diseño ($J_{\text{diseño}}$) que permita la operación sostenible y estable de la membrana a largo plazo. Para determinar el área de superficie de la membrana, debe llevarse a cabo un diseño sensible para condiciones de funcionamiento críticos.

2.4.6. Eficiencia en la remoción de contaminantes de la tecnología MBR

Dependiendo del tamaño nominal del poro de la membrana, así el efluente tendrá menor o mayor calidad. Como indicadores de su eficiencia, se tienen los siguientes valores: SST menor a 1 mg/l, turbiedad menor a 0,2 UNT y una remoción de virus mayor de $4 \cdot \log$. En un sistema de MBR que cuente con una zona anóxica, es posible la remoción total del nitrógeno (Hai et al., 2014).

El Cuadro 10 muestra los valores promedio de eficiencia de un sistema de iMBR, para los principales parámetros indicadores de calidad del efluente.

Cuadro 10. Eficiencias de remoción en el sistema iMBR y calidad del efluente.

Parámetro	Calidad del efluente	Eficiencia de remoción (%)
SST (mg/l)	<2	>99
Turbiedad (NTU)	<1	98,8 a 100
DQO (mg/l)	10 - 30	89 a 98
DBO (mg/l)	<5	>97
DOC* (mg/l)	5 - 10	-
NH ₃ -N (mg/l)	<5,6	80 a 90
N total (mg/l)	<27	36 a 80
P total (mg/l)	0,3 - 2,8	62 a 97
Coliformes totales (CFU/100 ml)	<100	5 log a 8 log*
Coliformes fecales (CFU/100 ml)	<200	-
Bacteriofagos (PFU/100 ml)	-	>3,8 log*
*: Unidades log, ver Cuadro 5.		

Fuente: Adaptado de Melin et al., 2005 y Yoon, 2011.

2.4.7. Producción y manejo de lodos en la tecnología de MBR

La producción de lodos de un sistema de MBR es igual o ligeramente mayor que en el sistema de LAC. La mayor diferencia se refleja en el aumento de los residuos provenientes del pretratamiento (Hai et al., 2014).

Los sistemas de LAC a gran escala que operan a TRS y condiciones de aireación similares a los sistemas de MBR, tienen una capacidad de deshidratación de los lodos similar (Hai et al., 2014). Esta deshidratación de lodos en el sistema MBR, puede efectuarse desde el tanque de aireación, no requiriendo tanque de sedimentación o retención de lodos (Hai et al., 2014).

2.4.8. Requerimientos técnicos específicos para la tecnología MBR

2.4.8.1. Pretratamiento del afluente

Todos los sistemas de MBR requieren un riguroso pre-tratamiento del afluente. La obstrucción y/o atasco de materiales fibrosos en las membranas es muy perjudicial, especialmente para los módulos de fibra hueca, pues para este tipo de membranas los restos atrapados sólo pueden ser extraídos de manera manual; mientras que en los módulos de hoja plana, es posible extraer los residuos atascados mediante un lavado mecánico de la superficie, después de haber extraído todos los paneles del módulo (Yoon, 2011). La Figura 19 muestra ejemplos de atascos.



Figura 19. Atascos de materiales fibrosos en sistemas de MBR por insuficiencias en el pretratamiento (falta de rejillas extra finas). (a) Atascos en membranas de fibra hueca. (b) Atascos en tuberías de aireación
Fuente: Yoon, 2011.

Estudios en Alemania y Gran Bretaña han determinado que los residuos de las rejillas y las pantallas, se componen principalmente de pulpa de papel y fibras finas de algodón (Figura 20) aunque la composición y la cantidad de materiales varía ampliamente, pues esto se ve afectado por los hábitos de la población usuaria del sistema de alcantarillado sanitario (Hai et al., 2014). Los materiales que se atascan comúnmente en las membranas son pelos y fibras de tela, los cuales al atascarse reducen la turbulencia cerca de ellos, generando que nuevos materiales queden atrapados con los materiales fibrosos iniciales. Las fibras cortas y las partículas pueden reconstruirse en largas tiras o trapos dentro del licor de mezcla, que eventualmente podrían obstruir las membranas (Yoon, 2011).



Figura 20. Diferentes tipos de residuos recolectados de un alcantarillado sanitario.
Fuente: Yoon, 2011.

El riesgo de daño severo de la membrana se ha reducido decisivamente por medio de una efectiva eliminación de los residuos, lo que se ha logrado colocando una rejilla fina previo al paso del flujo por las membranas (Hai et al., 2014). Se recomienda que exista prefiltración con una grilla con tamaño de poro máximo de 3 mm (Melin et al., 2005) (Figura 21). Dependiendo del tipo de membrana utilizada en un sistema sMBR, se recomiendan los siguientes tamaños mínimos de tamiz para el cribado del afluente:

- Membranas de Hoja Plana (FS): menores a 3 mm
- Membranas de Fibra Hueca (HF): menores a 1 mm

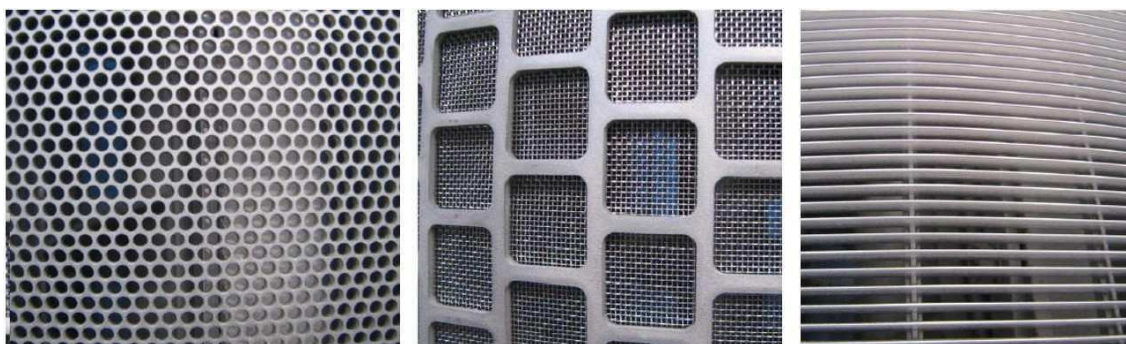


Figura 21. Diferentes tipos de rejillas finas para pretratamiento de la tecnología MBR.

Fuente: Yoon, 2011.

2.4.8.2. Requerimientos de oxígeno en el sistema

Los sistemas MBR, al contar con un reactor biológico similar a cualquier otro sistema de tratamiento biológico aeróbico, necesita de oxígeno para mantener la comunidad de microorganismos, degradar la materia orgánica y mantener la biomasa en suspensión. Así mismo, para la limpieza de las membranas (el “*air scour*”) se demandan altas concentraciones de oxígeno en los módulos de filtración, el cual debe aportarse mediante difusores de burbuja gruesa (Hai et al., 2014).

El cálculo de aire requerido debe considerar por separado los siguientes aportes de oxígeno: (1) la aireación mediante burbuja gruesa para agitar con aire las membranas “*air scour*”, (2) el arrastre de oxígeno resultante en el compartimiento de filtrado y (3) la aireación por burbuja fina adicional requerida para la aireación del reactor biológico (Hai et al., 2014).

Como una primera estimación aproximada del arrastre de oxígeno en el compartimento de

filtración, la concentración de oxígeno se puede considerar el 50% al 90% de la concentración de saturación de oxígeno disuelto a las condiciones de proceso respectivas (Hai et al., 2014).

2.4.8.3. Ensuciamiento y mantenimiento de las membranas

El tema de ensuciamiento de las membranas es uno de los aspectos más importantes referentes a la operación de los sistemas de MBR. El deterioro físico y el ensuciamiento irreversible dañan permanentemente la membrana.

El ensuciamiento puede presentarse sobre la superficie de la membrana, formando una capa de suciedad “*cake fouling*”, o bien, dentro de los poros de la membrana “*pore blocking*”. Algunas de las razones que provocan el ensuciamiento son:

- a) Deposición y acumulación de componentes del afluente (microorganismos, coloides, solutos, restos celulares, entre otras partículas) en los poros de la membrana (por partículas pequeñas) o en la superficie de la misma (por partículas grandes).
- b) Formación de precipitados químicos inorgánicos en los poros de la membrana, debido a las propiedades químicas del afluente.
- c) Daños en la membrana debido a la presencia de sustancias químicas que reaccionan con el material de la membrana, o agentes biológicos que pueden colonizarla.

El ensuciamiento se puede clasificar en:

- a) **Físico reversible:** Las partículas están atrapadas temporalmente en la membrana y su limpieza es rápida y fácil por medios físicos (Hai et al., 2014).
- b) **Químico reversible:** Las partículas se encuentran tenazmente adheridas a la membrana y requiere limpiarse por medios químicos (Hai et al., 2014).
- c) **Irreversible:** Las partículas se encuentra permanentemente unidas a la membrana, provocando un daño irreversible (Hai et al., 2014). Este tipo de ensuciamiento se acumula durante un número de años y es uno de los parámetros que determina la vida útil de la membrana (Judd, 2006).

Los procesos de limpieza de la membrana que se utilizan comúnmente son físicos, químicos o combinando ambos (Figura 22).

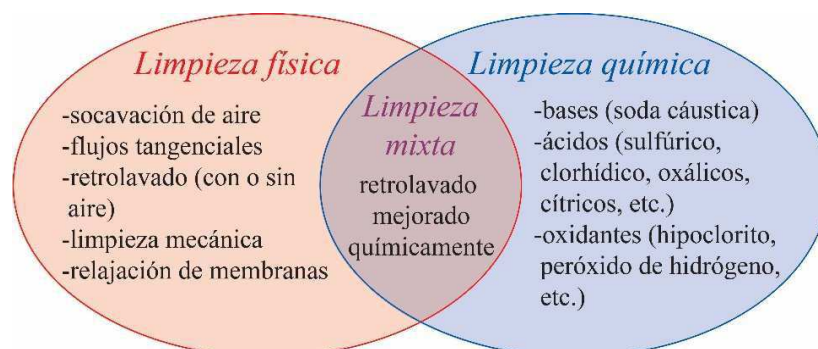


Figura 22. Métodos de limpieza de membranas

Fuente: Adaptado de Judd, 2006.

La limpieza física remueve sólidos gruesos y materiales fibrosos atrapados en la superficie de la membrana. Las técnicas de limpieza física consisten principalmente en:

- **Agitar la membrana con aire “air scour”:** Propulsar burbujas a las membranas para producir cizallas en su superficie, generando un movimiento similar a “peinarlas” para el desprendimiento de las partículas adheridas a su superficie (Hai et al., 2014).
- **Flujos tangenciales “cross-flow”:** Aplicación tangencial de un flujo sobre la membrana. Generalmente el flujo corresponde al licor de mezcla proveniente de la recirculación de lodos (Arévalo, 2011).
- **Retrolavados:** lavados a contracorriente, invirtiendo el flujo del líquido (con o sin aire). Son programados por ciclos automáticos. En la mayoría de los casos, el agua previamente permeada se utiliza para el retrolavado (Hai et al., 2014).
- **Relajación de membranas:** pausar por períodos cortos de tiempo el filtrado del permeado, pero sin discontinuar la aplicación de burbujas de aire “air scour” sobre las membranas (Judd, 2006).
- **Limpieza mecánica manual:** Se realiza para eliminar sólidos gruesos o acumulaciones de materiales, utilizando agua a presión o en ocasiones con la misma mano del operador, para desenredar fibras trenzadas (Hai et al., 2014).

La gran ventaja de la limpieza física es que no produce residuos químicos; además, incurre en menor grado en la degradación de la membrana. Sin embargo, es menos efectiva que la limpieza química (Judd, 2006).

La limpieza química consiste en la aplicación de agentes químicos sobre la membrana. Los agentes químicos más utilizados son el hipoclorito de sodio (NaClO), para remover

componentes orgánicos o depósitos de óxidos metálicos; y el ácido nítrico (HNO_3). Se aplican ácidos oxálicos o cítricos, para eliminar componentes inorgánicos. También, se aplican bases como el hidróxido de sodio (NaOH) “soda cáustica”, entre otros (Hai et al., 2014). El Cuadro 11 muestra algunos agentes químicos para limpieza y sus efectos.

Cuadro 11. Agentes químicos utilizados para limpieza de membranas.

Categoría	Químicos	Efecto Principal
Ácido	ácido cítrico, HCl , HNO_3	solubilización, quelación
Alcalino	NaOH	hidrólisis, solubilización
Oxidativo	NaClO , H_2O_2 , ácido peróxiacético	oxidación, desinfección
Detergentes	Surfactantes, agentes quelantes, enzimas	emulsificación, dispersión, quelación, acondicionamiento superficies

Fuente: Hai et al., 2014.

También, existen las técnicas de limpieza mixta (física y química), agregando bajas concentraciones de los agentes químicos al flujo del retrolavado, para producir un "retrolavado mejorado químicamente" (Judd, 2006). Se aplica durante períodos cortos de tiempo (0,5 h a 1 h) dependiendo de las recomendaciones del fabricante y el diseño de la fase de limpieza. Se puede diseñar el proceso de retrolavado en la misma línea con el sistema de permeado, o bien, en tanques separados donde se dosifican los agentes de limpieza. En todo caso debe evitarse mezclar agentes de limpieza ácidos con alcalinos (Hai et al., 2014).

La limpieza de mantenimiento *in-situ* (con el licor de mezcla en el reactor) se conoce como “*Cleaning-In-Place (CIP)*”. Su aplicación depende de las propiedades del proceso, puede ser una o dos veces por semana para MBRs municipales (Hai et al., 2014). El Cuadro 12 muestra un ejemplo de un protocolo de limpieza de mantenimiento CIP, el cual se aplica semanalmente.

Cuadro 12. Ejemplo de protocolo limpieza CIP (*Cleaning-In-Place*) de mantenimiento semanal.

Paso	Descripción	Duración
1	Cerrar un tren de filtración	-
2	Eliminar la aireación del tren de filtración	-
3	Vaciar el tanque de filtración (opcional)	1 h a 4 h
4	Intervalo de retrolavado minucioso con químicos	Aprox. 2 h
4.1	Limpieza con ácidos (ácido cítrico + HCl)	7 ciclos con duración: retrolavado 30 s, remojo 300 s
4.2	Retrolavado con el permeado	1000 segundos
4.3	Limpieza con alcalinos (NaOCl + NaOH)	7 ciclos con duración: retrolavado 30 s, remojo 300 s
5	Rellenar el tanque con la biomasa (opcional)	1 h a 6 h
6	Batir las membranas con aire “ <i>air scour</i> ” y la recirculación de biomasa	-
7	Continuar con la filtración	-

Fuente: Brepols, 2011.

La limpieza intensiva o “*Cleaning-Out-of-Place (COP)*” implica mayores concentraciones de los agentes químicos y tiene una duración mayor. Generalmente, se emplean flujos a altas temperaturas, para aumentar los efectos de limpieza; y también, se aplica la limpieza mecánica manual. Puede realizarse *in-situ* o *ex-situ*. Sin embargo, la limpieza *in-situ*, usando altas concentraciones de agentes químicos, no es aconsejable; ya que se ha observado que los compuestos basados en cloro (como el hipoclorito de sodio) afectan desfavorablemente las actividades microbiológicas en el reactor. Se recomienda que posterior a la limpieza *ex-situ*, se enjuague con agua limpia para eliminar residuos químicos (Hai et al., 2014). Los intervalos de limpieza intensiva pueden variar desde una vez en varios meses, a una vez en varios años. Esta limpieza requiere que el módulo de membrana específico a limpiar, se encuentre inactivo (Hai et al., 2014).

Los sistemas eMBR generalmente tienen una frecuencia de limpieza de membranas de 1 a 2 meses, mientras que para los sistemas sMBR las membranas se limpian con un intervalo de 2 a 6 meses. Siempre que sea inevitable realizar la limpieza *in-situ*, la dosificación química debe ser moderada para evitar daños a la actividad microbiana en el reactor (Hai et al., 2014).

Se debe diseñar el proceso de limpieza de todos los sistemas de MBR, tomando en cuenta el tipo de membrana, su funcionamiento, el proceso de tratamiento y las propiedades del agua residual a tratar. Tener un control periódico y eficiente de limpieza de la membrana es la “columna vertebral” del funcionamiento sostenible del sistema MBR (Hai et al., 2014).

Los procesos de limpieza deben evaluarse continuamente. Cuando es evidente un ensuciamiento muy rápido, ya sea por las condiciones de trabajo de las membranas o por las características del agua residual, se recomienda que una vez al mes, se eleven los racks de los módulos de membranas y se realice una limpieza rápida con agua a presión, para eliminar los inicios de la colmatación y alargar el tiempo entre limpiezas (Hai et al., 2014).

La experiencia en España con sistemas de MBR, ha determinado que es necesario este tipo de limpieza cuando la presión transmembrana (PTM) haya aumentado de 5 kPa a 10 kPa del valor inicial (Iglesias, 2014).

Otras variables que determinan la vida útil de las membranas pueden ser: por fallas mecánicas (de las membranas o de los módulos), una instalación incorrecta, contacto prolongado con los agentes de limpieza (que causan delaminación de la membrana), calados en la superficie

por materiales abrasivos o punzantes presentes en el afluente, estrés y tensión que ocurre en el sistema debido al movimiento de la fibra y el retrolavado de la membrana, entre otras variables (Hai et al., 2014).

2.4.8.4. Capacitación y asistencia de los operadores

Es necesario contar con mano de obra calificada y motivada, tanto para garantizar una puesta en marcha rápida y eficiente, como un control fiable durante su operación.

La complejidad y la sofisticación de los procesos de operación y mantenimiento de un sistema de MBR, puede incurrir en un sobreesfuerzo para los operadores que no están acostumbrados al proceso. Por tanto, se requiere una formación teórica y práctica para los operadores y la supervisión cercana por parte de expertos (Hai et al., 2014). Dicha formación debe ser intensiva, que les permita desarrollar una manera de pensar, observar y operar para resolver los posibles problemas que se presenten, de una forma muy diferente a un sistema convencional.

Algunas de las tareas más importantes que deberán cumplir son: mediciones de los parámetros para el afluente, el efluente y el lodo; chequear la estabilidad de infiltración de las membranas (permeabilidad); entre otras tareas muy importantes que demandan mucho tiempo (Melin et al., 2005).

2.4.8.5. Consumo energético

El consumo energético de un sistema de MBR varía, dependiendo de las circunstancias particulares de cada PTAR (según los parámetros de diseño y el modo de operación específico). Se analizaron cinco sistemas de MBR en el año 2011, ubicados en España, donde se determinó que los consumos energéticos varían de 0,7 a 1,2 kWh-m³ (Iglesias, 2014).

Según estudios recientes, el consumo energético de un sistema de MBR, es comparable al sistema LAE con eliminación de nitrógeno y posterior tratamiento sin membrana, cuyo consumo oscila entre 0,65 a 1 kWh/m³ (Iglesias, 2014). También, se compara con el sistema LAC con tratamiento terciario, utilizando ultrafiltración por membranas pero en una sola unidad (Hai et al., 2014).

El proceso con mayor consumo energético dentro del sistema de MBR corresponde a la

limpieza de las membranas con aire (“*air scour*”). Según estudios realizados en plantas de tratamiento en Europa, los costos por consumo de energía por el “*air scour*” corresponden al 49,2% del consumo total de la PTAR (Brepols, 2011). Sin embargo, actualmente se está investigando en este tema, mejorando los módulos, probando nuevos materiales, estructuras y geometrías en las membranas para reducir la demanda energética requerida para su agitación con aire (Hai et al., 2014).

2.4.8.6. Vida útil de las membranas

La vida útil de las membranas depende de su configuración, el material y las condiciones de operación y mantenimiento (Judd, 2006).

Hai et al. (2014) indica que las membranas sumergidas internas se deben reemplazar a partir de transcurridos los 5 años, y de 7 años para el caso de las membranas sumergidas externas. Más recientemente se pueden encontrar membranas con más de ocho años de estar en funcionamiento (Iglesias, 2014).

Plantas a gran escala aún se encuentran operando con los módulos de membranas colocados originalmente. Por ejemplo, la PTAR de Nordkanal (Kaarst, Alemania) tiene nueve años de operación continua y el rendimiento de la filtración aún es buena. En Norte América existen sistemas de membranas tipo fibra hueca (HF) que recientemente han reportado diez años de vida útil (Hai et al., 2014).

Recientes investigaciones sugieren asumir una vida de membrana de 10 años, pues se han encontrado sistemas con 13 años de vida útil demostrados, y muchas otras plantas sin requerimientos de reemplazo pasados los 10 años (Judd, 2011).

2.4.8.7. Puesta en marcha del sistema MBR

Una vez instaladas las membranas en los reactores, se deben realizar pruebas con agua limpia para comprobar que todo funciona adecuadamente. Se debe asegurar que no existan fugas ni obstrucciones en las tuberías, en conducciones, conexiones y en todo el equipamiento (Yang, 2013).

Se debe desalojar el aire interno existente en las membranas mediante el paso de agua por las

mismas. De esta manera, se pierde la capa protectora con que cuentan y a partir de ese momento, las membranas no pueden dejar de estar húmedas. Pues en caso contrario, se reducirá su capacidad de filtración de forma significativa. Si no se va a iniciar la operación inmediatamente, las membranas se deberán dejar sumergidas en agua limpia (Yang, 2013).

2.5. Reúso o recuperación de las aguas residuales

El RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33601-S-MINAE) define el reúso de las aguas residuales como el aprovechamiento de un efluente de agua residual (ordinaria o especial) para diversos fines.

El término de “reúso” o “reciclaje” de agua, se modificó en el Estado de California (EE.UU.) en 1995, con el propósito de ganar la aceptación de la población, sustituyéndose por “recuperación del agua” o “agua regenerada” (“*water reclamation*” en inglés) (CONAGUA, 2016). Asano et al. (2007) define que la recuperación o la regeneración del agua es el tratamiento de las aguas residuales, para que éstas sean reutilizables con una fiabilidad de tratamiento definido, cumpliendo con criterios de calidad del agua.

Muchas ciudades del mundo se acercan al límite del abastecimiento de agua potable, por lo que la recuperación del agua se ha convertido en una solución atractiva para conservar y extender la disponibilidad del abastecimiento (CONAGUA, 2016). Malgarejo (2009) explica que las aguas regeneradas tienen importantes ventajas, tales como: (1) incrementan los recursos disponibles, (2) son más baratas que los trasvases o la desalinización, (3) permiten reducir la sobreexplotación de acuíferos y (4) están proporcionando caudales ecológicos.

El Cuadro 13 resume las razones fundamentales para la regeneración y el reúso del agua, sus beneficios y los factores que impulsan su implementación.

Cuadro 13. Razones fundamentales para la regeneración y el reúso del agua, sus beneficios y los factores que impulsan su implementación

Razón fundamental de la regeneración y reúso del agua
• El agua es una fuente limitada
• Reconocer que es posible reciclar el agua y que cada vez se suman más países
• La calidad del agua recuperada es apropiada para muchas actividades no potables, como irrigación, enfriamiento (industrias) y limpieza con lo cual se proveerá una fuente extra de agua, la cual puede resultar efectiva y eficiente
• Para cumplir con el objetivo de la sostenibilidad de los recursos hídricos, es necesario asegurarse de que se utiliza el agua de manera eficiente
• La recuperación y el reúso del agua permite la protección del ambiente mediante la reducción del volumen del efluente tratado a ser descargado a diversos cuerpos receptores
Beneficios potenciales de la regeneración y reúso del agua
• Conservación de los suministros de agua dulce
• Administración de los nutrientes que pueden conducir al deterioro del ambiente
• Se promueve la protección de ambientes acuáticos sensibles, reduciendo las descargas de los efluentes
• Se contienen ventajas económicas, reduciendo la necesidad de crear fuentes de agua suplementarias así como sus estructuras
• Los nutrientes del agua recuperada puede compensar la necesidad de utilizar suplementos fertilizantes
Factores que impulsan la futura implementación del agua regenerada y su reúso
• Proximidad: el agua recuperada será fácilmente disponible para el medio ambiente urbano, sobre todo donde se requieren más fuentes de agua y más costosas
• Confianza: el agua recuperada proporciona una fuente segura de agua
• Versatilidad: técnica y económicamente se proporcionará un tratamiento a las aguas residuales de tal modo que éstas pueden ser utilizadas para usos no potables o cumplir con los requerimientos para un agua potable
• Seguridad: el reúso no potable del agua ha sido utilizado desde hace cuatro décadas sin presentar impactos a la salud
• Demandas de recursos hídricos: aumento de la presión sobre fuentes de agua existente, así como el crecimiento de la población y la creciente demanda en la agricultura
• Responsabilidad física: reconocimiento de los gestores del agua y de aguas residuales con respecto a los beneficios económicos y ambientales al utilizar agua de reúso
• Interés público: incrementar el conocimiento del beneficio de utilizar agua de reúso para que éste sea bien aceptado
• Dar un costo preciso del agua: la introducción de cargo por agua de reúso para los consumidores
• Necesidad y oportunidad: factores motivantes para el desarrollo de proyectos con agua de reúso, así como la implementación de condiciones favorables para recuperar agua y poder reutilizarla

Fuente: CONAGUA, 2016.

Las principales directrices internacionales que regulan el reúso de aguas residuales han sido aportadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO por sus siglas en inglés *Food and Agriculture Organization of the United Nations*), donde establecen límites de calidad microbiológica (parásitos y coliformes fecales) y físico-química para las aguas de riego, con el objetivo de maximizar la seguridad para la salud pública (Silva et al., 2008).

El RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33601-S-MINAE) establece las condiciones en las que se

permite el reúso de las aguas residuales tratadas en Costa Rica. Se regulan 8 tipos de reúsos permitidos y se indican los límites de calidades microbiológicas del efluente permitidas para cada tipo de reúso. Adicionalmente, se señala que en ningún caso se podrán utilizar estas aguas para el consumo humano. El Cuadro 14 detalla la clasificación de los tipos de reúso permitidos en dicho reglamento.

Cuadro 14. Clasificación de los tipos de reúso de aguas residuales del RVRAR D.E.33601-MINAE-S.

Tipo	Nombre	Descripción
1	Reúso urbano	Riego de zonas en donde haya acceso del público (por ejemplo: en zona verdes, campos de golf, parques, plazas deportivas y cementerios), lavado de automóviles, inodoros, combate de incendios y otros usos con similar acceso o exposición al agua.
2	Riego con acceso restringido	Cultivo de césped, silvicultura y otras áreas donde el acceso del público es prohibido o restringido.
3	Reúso agrícola en cultivos de alimentos que no se procesan previo a su venta	Riego superficial o por aspersión, de cualquier cultivo comestible que no se procese previo a su venta, incluyendo aquellos que se consumen crudos.
4	Reúso agrícola en cultivos de alimentos que se procesan previo a su venta	Riego de cultivos que, previo a su venta al público, han recibido el procesamiento físico o químico necesario para la destrucción de los organismos patógenos que pudieran contener.
5	Reúso agrícola en cultivos no alimenticios	Riego de pastos de piso, forrajes, cultivos de fibras y semillas, y otros cultivos no alimenticios.
6	Reúso recreativo	Reúso en cuerpos de agua artificiales donde pueda existir un contacto ocasional (por ejemplo: pesca, canotaje y navegación).
7	Reúso paisajístico	Aprovechamientos estéticos donde el contacto con el público no es permitido, y dicha prohibición esté claramente rotulada.
8	Reúso en la construcción	Compactación de suelos, control del polvo, lavado de materiales, producción de concreto.

Fuente: Decreto Ejecutivo N°33601-MINAE-S, 2007.

Generalmente, las aguas residuales tratadas en los países desarrollados, son reutilizadas para usos como el riego agrícola y en la industria (sistemas de enfriamiento, lavados, calderas, etc.). En el caso de los sistemas en los que se calienta el agua los sólidos disueltos se convierten en un parámetro importante, debido al riesgo de deposiciones calcáreas o problemas de corrosión en las tuberías (Asano, et al. 2007).

2.6. Metodología de análisis multicriterio (AMC) para la toma de decisiones

2.6.1. Introducción al análisis multicriterio

La decisión a tomar con respecto a la selección de la mejor tecnología de tratamiento de aguas residuales a implementar, se deriva de un balance entre aspectos técnicos y económicos y financieros (Sperling, 2007a). Adicionalmente, en los proyectos se deben considerar los aspectos ambientales y sociales, los cuales muchas veces son intangibles, por lo que se deben aplicar técnicas para su evaluación.

Una de las metodologías que facilitan la toma de decisiones para seleccionar la mejor solución a un determinado problema, es el análisis multicriterio, donde es posible evaluar diversas soluciones, considerando al menos dos criterios (donde éstos se encuentren en conflicto) y al menos dos alternativas de solución (Grajales et al., 2013). Esta metodología es muy apropiada cuando se analizan aspectos ambientales, ya que éstos se caracterizan por su complejidad, incertidumbre, irreversibilidad y equidad intergeneracional (Moreno et al., 2001).

2.6.2. Selección de criterios para la evaluación

El análisis multicriterio define los criterios que se utilizan para describir las alternativas, que pueden ser cuantitativos (objetivos) o cualitativos (subjetivos); además, se define una meta u objetivo, buscando un consenso entre actores de diversas disciplinas (agentes decisores) que participan en la toma de decisión (Grajales et al., 2013).

Tanto los criterios técnicos, como los ambientales y sociales, muchas veces son intangibles y la decisión final podría ser subjetiva. Se debe considerar coeficientes de ponderación atribuibles a los diferentes aspectos, siendo esencial la participación de un equipo multidisciplinario de expertos, de modo que la selección realmente conduce a la alternativa más adecuada para el sistema que se está analizando (Grajales et al., 2013).

No existen fórmulas generales para la asignación de valores a los coeficientes de ponderación, se requiere sentido común y experiencia para determinar la importancia relativa que se le atribuirá a cada aspecto a tomar en cuenta. Los criterios económicos son muy importantes; sin embargo, no necesariamente la alternativa de más bajo costo, según los

estudios económicos y financieros, sea la mejor (Sperling, 2007a).

Existen diferentes aspectos que pueden ser críticos e importantes para la selección de la tecnología de tratamiento (Sperling, 2007a). El autor compara los aspectos críticos e importantes entre países desarrollados y países en desarrollo, indicando que para los países desarrollados los aspectos críticos son usualmente: eficiencia, confiabilidad, disposición de lodos y requerimientos de terreno; mientras que para los países en desarrollo, los aspectos críticos suelen ser: costos de construcción, sostenibilidad, simplicidad y costos de operación (Figura 23).

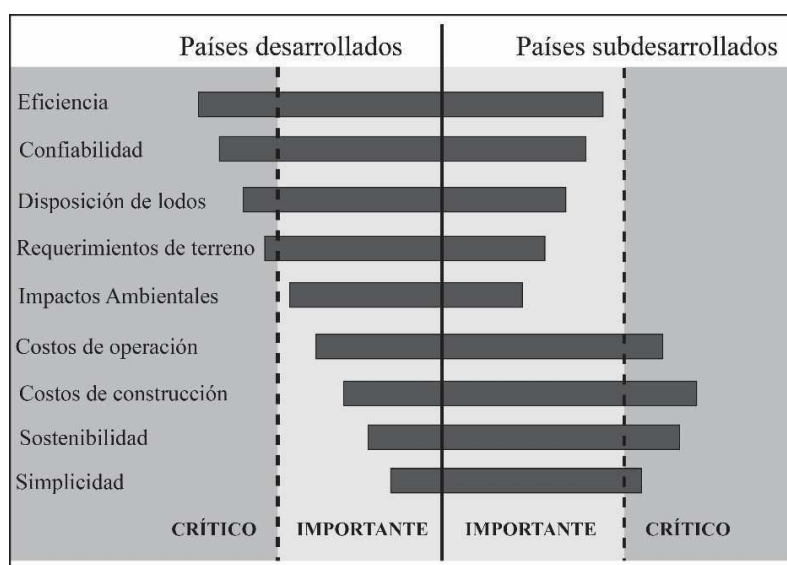


Figura 23. Aspectos importantes para la selección de la mejor tecnología de tratamiento de aguas residuales
Fuente: Adaptado de Sperling, 2007a.

CAPÍTULO III. OBJETIVOS Y **METODOLOGÍA**

CAPÍTULO III. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

3.1. Objetivo General

Evaluar la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos, a partir de un análisis de tres tecnologías: Lodos Activados Convencionales (LAC), Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membrana (MBR).

3.2. Objetivos Específicos

1. Analizar a nivel técnico el prediseño del tratamiento secundario mediante la tecnología de Lodos Activados Convencionales (LAC), realizado por la empresa Acciona Agua S.A.U. para la PTAR Los Tajos.
2. Realizar los diseños preliminares de dos diferentes tecnologías de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos: Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membrana (MBR).
3. Realizar un análisis financiero, mediante el método de Valor Actual de Costos (VAC), para cada una de las tecnologías prediseñadas: LAC, IFAS y MBR; a partir de la estimación de los costos de inversión inicial, costos de terreno y costos de operación y mantenimiento.
4. Elaborar un análisis multicriterio con los aspectos técnicos, económicos, ambientales y sociales más relevantes de las tres tecnologías (LAC, IFAS y MBR).

3.3. Metodología

3.3.1. Búsqueda de referencias y análisis de la información

Se realizó una búsqueda de bibliografía referente al tratamiento de las aguas residuales municipales y las metodologías de diseño teóricas para el tratamiento secundario del agua residual, enfatizando en los sistemas de Lodos Activados Convencionales (LAC), Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) y Biorreactores de Membrana (MBR). Se consultaron libros de texto, trabajos finales de graduación, artículos científicos, manuales, guías, reglamentos, informes y estudios relacionados con el tema. Se revisó información digital, accesible en Internet, tales como libros en línea, tesis, casos de estudio, noticias de

medios de comunicación publicadas, páginas de empresas proveedoras de equipo, entre otra información digital.

Se recopiló información en la Unidad Ejecutora AyA-JBIC, en la UEN de Recolección y Tratamiento de la Subgerencia de Sistemas Periféricos del AyA, así como de la Subgerencia de Sistemas GAM y del Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) del AyA. Se solicitó toda la documentación referente a: caudal a tratar, calidad del agua cruda, parámetros del prediseño del tratamiento secundario según la licitación pública internacional N°2008-0002-PRI, la oferta técnica y económica presentada por la empresa adjudicada para la construcción de la etapa I de la PTAR (*Acciona Agua S.A.U.*), entre otra información. Además, se realizaron entrevistas a actores claves en el proceso. No fue posible contactar a los ingenieros que prediseñaron la propuesta para la PTAR Los Tajos, pues la empresa Acciona Agua S.A.U. se reserva la información de las etapas para las cuales no ha sido contratada (etapa intermedia y etapa II).

Se investigó cuáles empresas internacionales son proveedoras de las tecnologías de IFAS y de MBR. Posteriormente, se les contactó para hacerles consultas técnicas de las metodologías de diseño, así como los criterios y las propuestas para el dimensionamiento de la tecnología específica que proveen.

Se realizaron consultas técnicas y de costos a operadores de plantas de tratamiento de otros países que hayan implementado estas tecnologías, principalmente IFAS y MBR. Se estudió el caso concreto de la implementación de IFAS en la PTAR El Roble (en Puntarenas), información que se le consultó a la UEN de Recolección y Tratamiento de la Subgerencia de Sistemas Periféricos del AyA y a la ingeniera encargada de los sistemas de saneamiento de la Región Pacífico Central.

Se sintetizó y analizó toda la información recopilada de cada tecnología estudiada: LAC, IFAS y MBR, seleccionando los temas más relevantes para este TFG, los cuales se describieron en el Marco Teórico. Se determinaron los parámetros de diseño para cada tecnología en particular, según las bases teóricas analizadas y criterio de experto mediante consulta a profesionales y proveedores de las diferentes tecnologías para el tratamiento de las aguas residuales.

3.3.2. Prediseños de las tecnologías LAC, IFAS y MBR

Se entiende por prediseño, para efectos de este TFG, el dimensionamiento de las principales unidades de tratamiento y su emplazamiento en sitio, así como la selección preliminar de los principales equipos mecánicos necesarios para cada tecnología de tratamiento secundario estudiada (LAC, IFAS y MBR).

Los diseños realizados y analizados en este TFG son preliminares, no finales. El diseño final para las siguientes etapas de la PTAR Los Tajos, corresponde a un trabajo multidisciplinario, donde intervienen profesionales expertos y técnicos de las áreas de: la ingeniería civil, sanitaria, eléctrica, mecánica, estructural, de cimentaciones, topografía, arquitectura, paisajismo, economía, sociología, gestión ambiental, entre otras disciplinas. Este TFG consideró principalmente aspectos de la ingeniería civil, la ingeniería sanitaria, la economía y la gestión ambiental.

Los tres prediseños se desarrollaron con la misma información base: (1) las estimaciones de población del área de estudio, (2) los caudales de entrada, (3) la calidad del agua residual cruda (afluente) y (4) la calidad esperada en el efluente; todo lo anterior señalado en la licitación pública internacional N°2008-0002-PRI del AyA “*Diseño finales, construcción, equipamiento, pruebas, puesta en servicio y transferencia tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos*”.

a) Prediseño LAC

Se revisó y analizó el prediseño existente de las diferentes unidades de tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos, prediseñadas por *Acciona Agua S.A.U.*, mediante la tecnología de LAC, solicitado así por el AyA en la licitación pública internacional N°2008-0002-PRI.

El prediseño realizado por Acciona Agua S.A.U. ha sido consultado en los documentos oficiales entregados al AyA dentro de su oferta técnica, en la versión de Plan Maestro (Acciona Agua S.A.U., 2010). Dentro de estos documentos, no se cuenta con una memoria de cálculo exhaustiva, que incluya: (1) los coeficientes y los parámetros seleccionados, (2) los cálculos intermedios explícitos, (3) las fórmulas, las proyecciones y los modelos utilizados, (5) las referencias bibliográficas o las fuentes de información específicas, y (6) las

suposiciones y la justificación de algún criterio técnico aplicado por parte del(los) diseñador(es). Únicamente se cuenta con el resumen de los resultados, y las soluciones del modelo generadas en el software GPS-X de Hydromantis, Inc., utilizado por la empresa. Debido a lo anterior, el análisis de la propuesta de LAC estuvo limitado por la información contenida dentro del Plan Maestro.

b) Prediseño IFAS y MBR

Existen diferentes materiales en el mercado para la fabricación de biosoportes y membranas, así como variaciones en las configuraciones de estos sistemas. Los diseños de la tecnología de IFAS y de MBR, son particulares dependiendo del tipo de biosoporte (para el caso de IFAS) o de membrana (para el caso de MBR) que se utilicen.

Se realizó una selección previa de los mejores biosoportes y membranas para la PTAR Los Tajos, y a partir de esta selección, se realizaron los prediseños de estas dos tecnologías. Se utilizaron las metodologías y los parámetros específicos de diseño, considerando tanto referencias bibliográficas, como criterios de expertos y colaboración por parte de las empresas proveedoras contactadas.

Cada empresa que provee estas tecnologías cuenta con metodologías de diseño modificadas a través de la experimentación propia, variando algunos de los parámetros de diseño teóricos. Es por esto, que las metodologías de diseño por medio de estas dos tecnologías no se encuentran documentadas por completo en referencias bibliográficas. Generalmente, las empresas se reservan el derecho de revelar las modificaciones que hayan realizado a las metodologías teóricas fundamentadas.

Se realizaron siete solicitudes de dimensionamiento a diferentes empresas proveedoras de sistemas de la tecnología de MBR. Sin embargo, únicamente se obtuvo respuesta de una empresa (*Evoqua Water Technologies*). Las otras seis empresas no se manifestaron interesadas en participar del estudio, pues consideraron poco viable la aplicación de este sistema en Costa Rica, al conocer tanto la regulación poco estricta en los L.M.P. (principalmente de remoción de nutrientes), como la ausencia de estudios de mercado que aseguraran el interés de clientes para la compra y aprovechamiento del efluente tratado.

La colaboración para el prediseño de la tecnología IFAS, se solicitó únicamente a la empresa *Headworks Bio Inc.*, por ser la empresa previamente seleccionada en un estudio de mercado realizado por la UEN de Recolección y Tratamiento de la Subgerencias de Sistemas Periféricos del AyA en el 2013, para la implementación de la tecnología IFAS en la PTAR de El Roble de Puntarenas.

Las empresas internacionales proveedoras de estas tecnologías que colaboraron con esta investigación, aportaron propuestas de dimensionamiento con parámetros de diseño seleccionados con criterio de experto. Los tiempos de respuesta de dichas empresas correspondieron a una de las principales limitaciones, pues fueron varios meses de intercambio de información y espera de respuesta, hasta contar con los prediseños finales.

3.3.3. Estimación de costos y análisis financiero

a) Inversión inicial

Dentro de la información contenida en el Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U. (2010), se encuentra el emplazamiento en sitio de cada unidad de tratamiento, tanto para la etapa intermedia como para la etapa II, insumo utilizado para estimar el área de terreno requerida para la tecnología LAC.

Las diferentes unidades de tratamiento secundario de las tecnologías de IFAS y de MBR, se emplazaron en el terreno disponible para la PTAR Los Tajos, según los planos del sitio aportados por la UE AyA-JBIC.

Utilizando las áreas requeridas para las tres tecnologías en estudio, se estimó el costo correspondiente a la adquisición de los terrenos para cada etapa.

Tanto para la tecnología de LAC como de IFAS, se consideró el costo de construcción del túnel que conecta los terrenos Tajo Norte y Tajo Sur, el cual fue estimado por consultores expertos en túneles en marzo 2016, actualizado a enero 2017 mediante el Índice de Precios del Sector Construcción del INEC.

Se revisó la oferta económica propuesta por la empresa Acciona Agua S.A.U., para las tres

etapas de construcción de la PTAR Los Tajos, entregada en enero del 2010. Los montos indicados en la oferta económica, de la etapa intermedia y la etapa II no se encuentran desglosados por rubro y cantidades, únicamente se señala un monto global, a diferencia de los montos indicados para la etapa I, los cuales se encuentran detallados por unidades de tratamiento. Debido a lo anterior, el monto correspondiente –y exclusivamente– con el tratamiento secundario mediante la tecnología de LAC, fue estimado a partir de: (1) el dato global de costo de la etapa intermedia y etapa II, (2) las unidades de tratamiento que serían ampliadas de la etapa I a las siguientes etapas (unidades de pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento de lodos y de olores) y (3) los costos de estas unidades presentes en la etapa I (incluidos en el presupuesto detallado de la oferta económica de Acciona Agua S.A.U.). Estos costos resultantes fueron actualizados a enero 2017, mediante el Índice de Precios al Productor Industrial (IPPI) con combustible del BCCR.

Los costos de construcción de las diferentes unidades de tratamiento para las tecnologías de IFAS y de MBR, han sido estimados mediante consulta a empresas costarricenses de construcción de plantas de tratamiento de aguas residuales, durante noviembre de 2015 y abril del 2016, costos que se actualizaron a enero de 2017 por medio del Índice de Precios del Sector Construcción del INEC. Dichos costos no incluyen cálculos de: movimiento de tierra, obras de estabilización de suelos, excavaciones, nivelación del terreno, o cualquier otro aspecto específico de los terrenos “Los Tajos”.

Se consultó a diferentes empresas nacionales e internacionales sobre la selección de los mejores equipos (a nivel electromecánico) para la PTAR Los Tajos, ya sean sopladores, bombas (para recirculación o purga de lodos), difusores, entre otros. Esta selección de equipo se basó en el criterio técnico aportado por expertos de diferentes disciplinas de las empresas consultadas, principalmente para equipo para las tecnologías de IFAS y MBR.

Se solicitaron las cotizaciones de los prediseños a las dos empresas internacionales que colaboraron con esta investigación: *Headworks Bio Inc.* para el prediseño mediante IFAS (entregada en su versión final en enero de 2016) y *Evoqua Water Technologies* para el prediseño mediante MBR (entregada en su versión final en abril 2016), incluyendo los costos del equipo tecnológico específico que provee cada empresa, con el objetivo de contar con los datos de la implementación de estas tecnologías en Costa Rica. Estos costos se actualizaron

a enero de 2017 mediante los índices de inflación de los EE.UU.

El costo del rubro de automatización y control para la etapa I de la PTAR Los Tajos, se obtuvo a partir de un análisis de los costos de esta etapa, resultando un porcentaje de 3,91% de los costos totales de la obra. Este porcentaje se modificó según cada tecnología (IFAS y MBR) al incorporar el tratamiento secundario, pues es cuando se requiere mayor control y monitoreo del proceso.

La cuantificación y la cotización de accesorios eléctrico-mecánicos y tuberías internas de la PTAR se consideran fuera del alcance de este proyecto. La determinación del costo de estos rubros, se basó en porcentajes típicos presentes en la literatura consultada.

b) Operación y mantenimiento (O&M)

Los costos de O&M exclusivos del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos, fueron estimados para las tres tecnologías analizadas (LAC, IFAS y MBR), tanto para la etapa intermedia como para la etapa II.

Se determinaron las actividades operativas más importantes de cada tecnología, obtenido a partir de entrevistas con ingenieros del AyA que operan PTARs, de consultas a expertos internacionales y referencias bibliográficas. Lo anterior permitió estimar la cantidad de personal requerido y la asignación de los puestos para el cálculo de salarios.

La estimación de cantidad del personal y de sus puestos es preliminar, su selección definitiva se realiza mediante un estudio de actividades específicas a realizar, horarios o turnos de trabajo, capacidades técnicas buscadas, entre otros temas donde participa la gestión de capital humano.

Se calcularon los costos por los consumos eléctricos y el mantenimiento de los equipos electromecánicos a instalar, los costos por adquirir insumos (sustancias químicas, accesorios, etc.) que requiere cada tecnología y se estimó el costo por canon ambiental de vertidos, según la calidad del efluente en cada caso.

Se excluyó del análisis el costo por la gestión del lodo (tratamiento, transporte y disposición).

c) Análisis financiero

El análisis financiero se realizó mediante el método de Valor Actual de Costos (VAC), utilizando los costos de inversión inicial, los costos de la adquisición del terreno y los costos de O&M, para un período económico de 20 años, a partir de la entrada en operación de la etapa II en las tres tecnologías estudiadas. Todos los costos fueron traídos a valor presente.

El método VAC, como su nombre lo indica, incluye únicamente análisis de costos. Se excluyeron del análisis los ingresos, por las dificultades de su estimación.

La aplicación del método VAC incluyó la valoración económica de los impactos ambientales, únicamente por medio del instrumento establecido en el Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos (Decreto Ejecutivo N° 34431-MINAE-S). No se aplica ningún otro instrumento de valoración económica para los aspectos ambientales.

3.3.4. Análisis Multicriterio (AMC)

Se utilizó la metodología de análisis multicriterio (AMC) como instrumento para la selección de la tecnología óptima a implementar en el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos. Dicho análisis evaluó nueve criterios a nivel: técnico (área de terreno, facilidades operativas, experiencia institucional y sensibilidad ante picos de caudal o concentración); económico-financiero (resultado del VAC); ambiental (consumo energético, calidad del efluente y producción de lodos) y social (posibilidad de reúso); elegidos según criterio de la autora, con colaboración de un experto en el tema.

Las tres tecnologías de tratamiento secundario se evalúan individualmente para la totalidad del proyecto (etapa intermedia y etapa II). No se analizó ninguna posible combinación de las tecnologías entre las etapas de construcción planificadas.

Se asignaron pesos (valores) a cada criterio, según los niveles de importancia de Sperling (2007a). Cada uno de los criterios evaluados se calificó del 1 al 4, según: el resultado de los prediseños; las características particulares de cada tecnología, según la investigación teórica realizada y el análisis financiero (VAC). Finalmente, se ponderaron todos los valores,

obteniéndose un único porcentaje de calificación.

El AMC fue realizado por un único profesional (la autora), quien asignó valores para la ponderación de los criterios, a partir de juicio propio y consulta a otros profesionales. No existió una discusión con la participación activa de un equipo de expertos de las diferentes disciplinas, relacionadas con el análisis en cuestión, siendo ésta una limitación para la aplicación del AMC en este TFG.

El resultado de la mejor tecnología a implementar para la PTAR Los Tajos, se indicó en las conclusiones finales de este TFG; además se aportaron recomendaciones para su futura implementación.

CAPÍTULO IV. PTAR LOS TAJOS

CAPÍTULO IV. PTAR LOS TAJOS

4.1. Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José (PMAAMSJ)

4.1.1. Descripción del PMAAMSJ

El PMAAMSJ está compuesto por dos grandes proyectos que contemplan:

- **Proyecto 1:** el diseño y la construcción de obras de extensión y rehabilitación de las redes del alcantarillado sanitario del área metropolitana.
- **Proyecto 2:** el diseño, la construcción, el equipamiento y la operación asistida de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de San José “PTAR Los Tajos” (Brenes, 2009).

El proyecto 1 de rehabilitación y ampliación de las redes de alcantarillado sanitario, consiste en un conjunto de obras de reemplazo, desvío, rehabilitación y reparación de colectores y redes secundarias existentes; ampliación de colectores nuevos: en el norte los colectores Rivera y Torres, y en el sur los colectores María Aguilar y Tiribí; construcción del túnel de trasvase (Túnel Los Hatillos) y construcción del emisario final (Emisario Metropolitano) por el cual se dirigirán todas las aguas residuales recolectadas hasta la PTAR Los Tajos (Cuadro 15 y Figura 24).

Cuadro 15. Resumen componentes generales del proyecto 1 del PMAAMSJ en la etapa I.

Componentes	Longitud (km)
Reparación de colectores	17,2
Reemplazo de colectores	20,5
Rehabilitación, desvío y nuevos colectores	127
Rehabilitación de redes secundarias	42
Nuevas redes secundarias	134
Túnel de trasvase (2,2 m de diámetro)	1,8
Emisario Final (2,2 -2,8 m de diámetro)	3,5

Fuente: Adaptado de Brenes (2009) y Jiménez (2012).

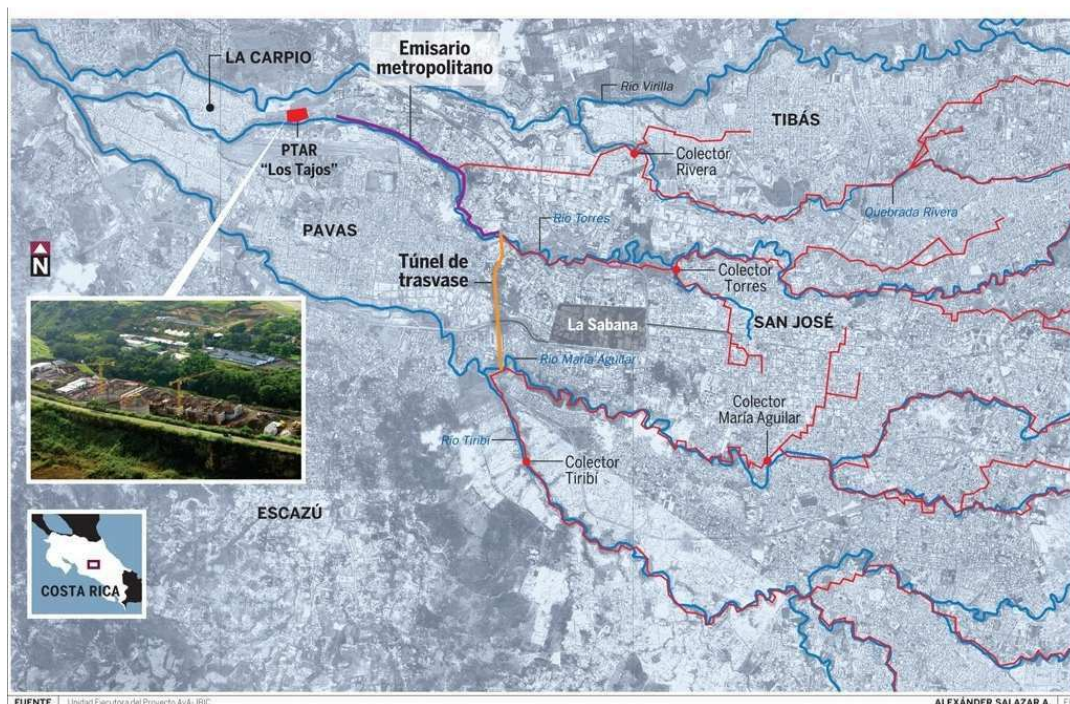


Figura 24. Rutas de los colectores de agua residual hacia la PTAR Los Tajos
Fuente: Fernández, 2014.

El proyecto 1 contempla la eliminación de descargas y conexiones ilícitas a la red de alcantarillado sanitario; además de la incorporación de una gran cantidad de desarrollos urbanísticos que cuentan con infraestructura de recolección interna, todo dentro del área metropolitana de San José (Brenes, 2009). Algunas zonas no contaban con alcantarillado sanitario, por lo que se han ido construyendo nuevas secciones de la red para alcanzar las metas de cobertura propuestas, atendiendo las proyecciones de crecimiento de la población.

El proyecto 2 consiste en la construcción de la PTAR Los Tajos, incluyendo toda la infraestructura y los equipos necesarios para darle el debido tratamiento al agua residual de tipo municipal de la ciudad de San José, con el fin reducir su carga contaminante al ser vertida al cuerpo receptor. Esta planta será la más grande de Centroamérica. El período de vida útil del proyecto, se ha calculado para 50 años, y su desarrollo se planificó en tres etapas:

- **Etapla I:** corresponde al pretratamiento y al tratamiento primario de las aguas residuales, tratamiento completo de lodos y tratamiento de olores, para el caudal promedio diario de 2,81 m³/s, caudal máximo diario de 3,45 m³/s y un caudal máximo horario de 4,86 m³/s. Esta etapa fue concluida en setiembre del 2015; sin embargo, para agosto del 2017, aún

el caudal de entrada no alcanza la capacidad de diseño de la etapa I, pues la red de alcantarillado sanitario está en construcción.

- **Etapa intermedia:** incorporación del tratamiento secundario de las aguas residuales, considerando todas las unidades de tratamiento y el caudal de diseño de la etapa I.
- **Etapa II:** aumento de la capacidad de todos los componentes de tratamiento de las etapas anteriores, para completar el proyecto con el caudal de diseño estimado para el 2025: caudal promedio diario de 4,26 m³/s, caudal máximo diario de 5,22 m³/s, y un caudal máximo horario de 7,35 m³/s.

El PMAAMSJ inició luego de haberse aprobado en la Asamblea Legislativa, el contrato del préstamo entre el Gobierno de la República de Costa Rica y el Banco del Japón para la Cooperación Internacional “JBIC”, a partir de la promulgación de la Ley N°8559 en noviembre del 2006. La Unidad Ejecutora AyA-JBIC⁴ se crea en abril del 2007, siendo el equipo profesional encargado de gestionar y ejecutar todo el proyecto relacionado con el préstamo en cuestión.

4.1.2. Beneficiarios del PMAAMSJ

Las proyecciones de población realizadas para el PMAAMSJ, indican que los beneficiarios para la etapa I y etapa intermedia serán 1.070.256 habitantes, que corresponde a un 65% de la población del área metropolitana de San José proyectada al 2015. La etapa II tendrá una cobertura del 85% de la población del área metropolitana de San José, proyectada para el 2025, que corresponde a 1.620.966 habitantes (AyA, 2010).

El área geográfica beneficiada en la etapa I, corresponde a 119 km², que incluye en total 11 cantones de la GAM: San José, Tibás, Moravia, Vásquez de Coronado, Goicoechea, Montes de Oca, Curridabat, Desamparados, Alajuelita, Escazú y La Unión (etapa I). La etapa II incorporará distritos adicionales de los cantones indicados para la etapa I.

El siguiente cuadro enlista los distritos por cantón y por provincia, que serán beneficiarios del proyecto en la etapa I.

⁴ A partir del Acuerdo de Junta Directiva del AyA N°2015-548, la Unidad Ejecutora AyA-JBIC fue integrada dentro de una nueva Unidad Ejecutora denominada “Programa de Agua Potable y Saneamiento del AyA (UE-PAPS)”.

Cuadro 16. Cantones y distritos beneficiados en la etapa I del PMAAMSJ

Provincia	Cantón	Distrito	Provincia	Cantón	Distrito
San José	San José	Carmen	San José	Alajuelita	San Felipe (parte)
		Merced		Escazú	San Rafael (parte)
		Hospital		Vásquez de Coronado	San Isidro: 1. San Rafael 2. Jesús (Dulce Nombre) ¹
		Catedral			Patalillo (San Antonio)
		Zapote			Cascajal ²
		San Francisco de Dos Ríos			Tibás
		Uruca (parte)		Cinco Esquinas	
		Distrito		Anselmo Llorente	
		Mata Redonda		León XIII	
		Hatillo		Colima	
		San Sebastián		Moravia	San Vicente
		Desamparados			Desamparados
	San Miguel			Montes de Oca	San Pedro
	San Antonio				Mercedes (Betania)
	Damas			Curridabat	Curridabat
	San Rafael Abajo				Tirrases
	San Rafael Arriba				Granadilla
	San Juan de Dios			Cartago	La Unión
	Gravilias		¹ : Cobertura del 20% ² : Cobertura del 10%		
	Goicoechea	Guadalupe			
		San Francisco			
		Calle Blancos			
		Ipís			
		Purral			
		Mata de Plátano			

Fuente: AyA, 2014.

4.2. Ubicación y características de la PTAR Los Tajos

4.2.1. Ubicación de la PTAR

El PMAAMSJ incluyó la realización de estudios preliminares y finales, los cuales analizaban tanto las rutas de ubicación de los colectores y las redes de alcantarillado sanitario, como la selección del sitio óptimo para la instalación de la PTAR de la ciudad de San José.

El estudio realizado por el equipo SAPROF (2004) analizó diferentes posibles sitios para

ubicar la planta de tratamiento, donde se consideraron los siguientes criterios: aspectos sociales-ambientales, posibilidad y accesibilidad para la construcción, aspectos operativos, posibilidad de expansión futura y costo preliminar a nivel del diseño conceptual para un horizonte al 2025. Se determinó con estos criterios, que la alternativa óptima es coleccionar todas las aguas residuales provenientes del sur y el norte del área metropolitana de San José, para tratarlas en un único sitio. Se propone ubicar la PTAR en un terreno de una cantera abandonada, en un área no poblada (Equipo SAPROF, 2004), conocido con el nombre de Los Tajos (Tajo Sur), sitio que finalmente fue adquirido por el AyA para la construcción de la etapa I de la PTAR.

El terreno Los Tajos está ubicado en la provincia de San José, cantón central de San José y en el distrito de la Uruca, aproximadamente a 3,5 km del Hospital México, sobre la carretera que comunica con la ciudadela La Carpio (Jiménez, 2012). La Figura 25 muestra un mapa con la ubicación geográfica del sitio. Las coordenadas CRTM05 de la PTAR Los Tajos son: longitud norte (X) 484.873,23 m y latitud este (Y) 1.101.503,64 m.

Las unidades de tratamiento incluidas en la etapa I están ubicadas en el terreno Tajo Sur (en la margen derecha del Río Torres). Dicho terreno fue inscrito como propiedad del AyA en enero del 2000 y cuenta con un área de 13,56 hectáreas.

La ubicación de las unidades prediseñadas para el tratamiento secundario, a construir en la etapa intermedia y etapa II, está propuesta de la siguiente manera: tanques de aireación en el terreno Tajo Sur y tanques de sedimentación secundaria en el terreno localizado al norte del primero, separado por el Puente de Piedra (Avenida 61) que comunica con La Carpio (Figura 26), terreno conocido como Tajo Norte (en la margen izquierda del Río Virilla). Este último terreno cuenta con un área de 14,32 hectáreas y está en proceso de adquisición por parte del AyA. Debido a esta separación entre los terrenos, deberá diseñarse un medio de conexión (túnel) que comunique las diferentes unidades de la PTAR (Acciona Agua S.A.U., 2010).

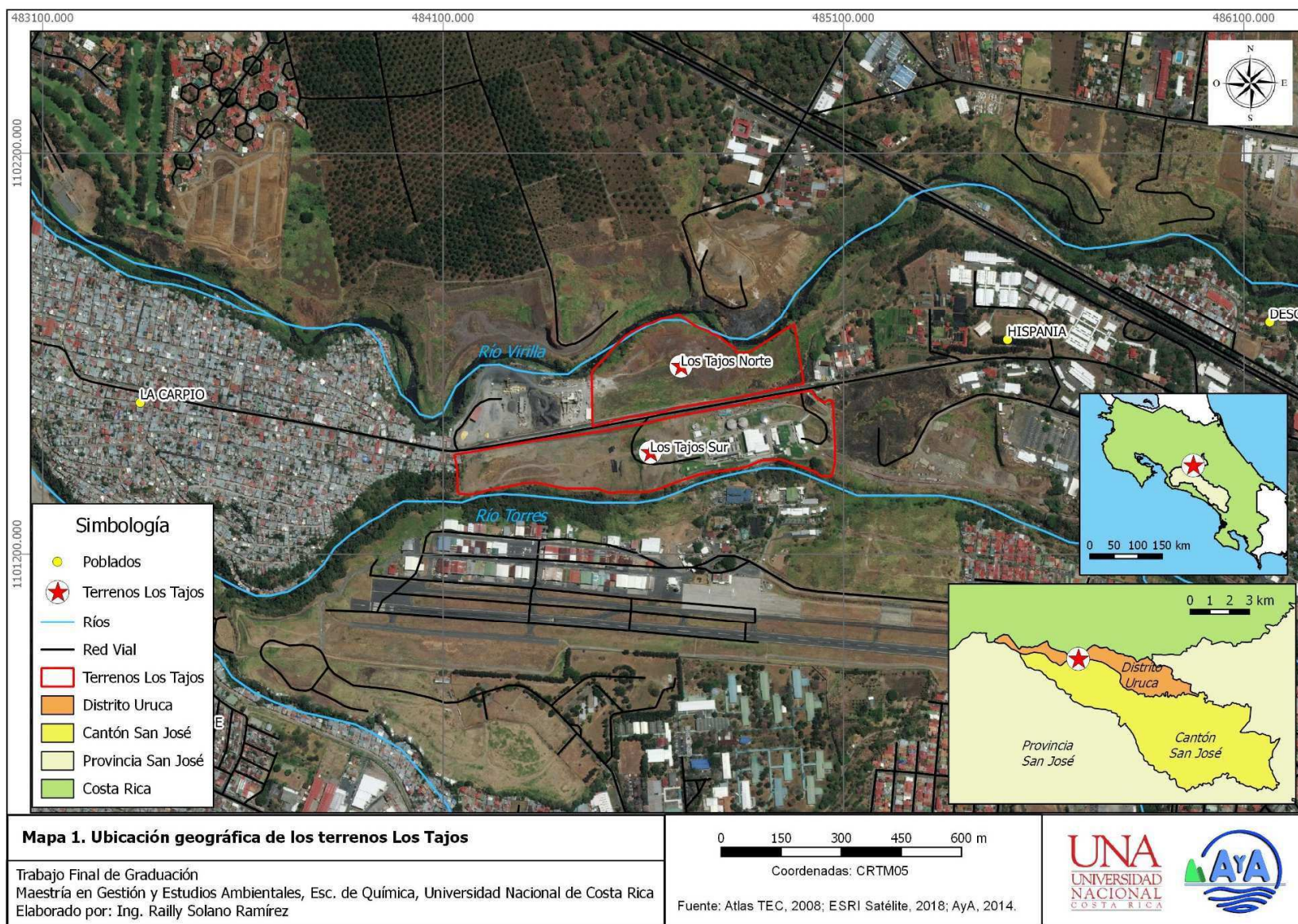


Figura 25. Mapa ubicación de los terrenos Tajos en el distrito Uruca, San José.



Figura 26. Terrenos Tajo Norte a la derecha y Tajo Sur a la izquierda, separados por el Puente de Piedra hacia la ciudadela La Carpio (ubicada en la parte superior de la fotografía).

Fuente: Iagua, 2012.

Ambos terrenos fueron anteriormente tajos de extracción de material, por lo que se encuentran alrededor de los 20 m de profundidad con respecto al nivel de la calle pública (Figura 26). Son terrenos relativamente planos, exceptuando el ingreso donde se presentan altas pendientes debido a la gran diferencia de nivel.

4.2.2. Características climáticas del sitio Los Tajos

El sitio forma parte de la Cuenca del Río Torres, en la subcuenca del Río Virilla, la cual cuenta con un clima cálido lluvioso. La estación meteorológica más cercana, está localizada aproximadamente a 8 km de la PTAR y pertenece a la red del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). Dicha estación tiene el nombre de “Pavas-Aeropuerto” (estación código 84074), su precipitación promedio anual va de los 1500 mm a los 2000 mm, mientras que su

temperatura promedio anual se encuentra entre los 17°C y los 23°C. Cuenta con dos épocas diferenciadas: época seca (de finales de noviembre a principios de mayo) y época lluviosa (desde mayo a inicios de noviembre). La dirección predominante de los vientos es de este a oeste con una velocidad promedio anual de 13,8 km/h a 15,8 km/h (AyA, 2010).

4.3. Diseño y construcción de la PTAR Los Tajos

4.3.1. Producción de agua residual

El estudio realizado por la Unidad Ejecutora AyA-JBIC “Cálculo de caudales para la PTAR 2008” (AyA, 2010), presenta los caudales proyectados para el 2015 y el 2025, los cuales se indican en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Caudales de aguas residuales proyectados al 2015 y 2025

Año y Etapa	Caudal (m³/s)		
	Promedio diario (QPD)	Máximo diario (QMD)	Máximo horario (QMH)
2015 (etapa I y etapa intermedia)	2,81	3,45	4,86
2025 (etapa II)	4,26	5,22	7,35

Fuente: AyA, 2010.

Los cálculos anteriores consideraron los siguientes criterios:

Cuadro 18. Criterios para el cálculo de caudales de aguas residuales

Criterios	Valores
Dotación (l/hab-d)	251
Factor Máximo Diario (FMD)	1,25
Factor Máximo Horario (FMH)	1,8
Infiltración (%)	10
Tasa de descarga residencial	0,8
Tasa de descarga comercial	0,9
Producción per cápita de aguas residuales domésticas (l/hab-d)	200,8
Producción per cápita de aguas residuales comerciales (l/hab-d)	225,9

Fuente: AyA, 2010.

4.3.2. Características físico-químicas del afluente

El Laboratorio Nacional de Aguas (LNA) del AyA hizo varias campañas de muestreo en los colectores y subcolectores del proyecto (más de tres campañas por cada uno), tanto en época seca como lluviosa, entre el 2000 y el 2002, recolectando muestras horarias durante 24 horas (24 submuestras), para luego integrarlas como muestra compuesta mediante el método proporcional al caudal horario.

Las campañas de muestreo realizadas reportaron los valores promedio de los parámetros de

calidad del agua residual afluyente (temperatura, DBO, DQO y SST) (Cuadro 19). Dentro del cartel de la L.P.I. del proyecto, se establece que tanto para la etapa I, como para las siguientes (etapa intermedia y etapa II), los diseños de las unidades de tratamiento a proponer, deberán basarse en los datos reportados para la época seca, pues se consideran críticos (AyA, 2010).

Cuadro 19. Resumen de los promedios de la campaña de muestreo (2000-2002) para el PMAAMSJ

Parámetro	Época seca	Época lluviosa
Temperatura (°C)	22	21
DBO (mg/l)	270	236
DQO (mg/l)	675	468
SST (mg/l)	290	222

Fuente: AyA, 2010.

4.3.3. Calidad físico-química del efluente para cada etapa de la PTAR Los Tajos

Al momento de solicitar el financiamiento de todo el proyecto de la PTAR, el AyA determinó que el capital y los costos de O&M del tratamiento secundario, excederían su capacidad financiera, por lo que sería necesario segmentar el proyecto en varias etapas, las cuales fueron descritas anteriormente.

Al implementarse la etapa I, por contemplar únicamente pretratamiento y tratamiento primario, no se cumple con los límites máximos permisibles para todos los parámetros físico-químicos de calidad del efluente establecidos en el RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33601-MINAE-S). El Decreto Ejecutivo N°32133-MINAE-S del 07 de diciembre del 2004, expresa la posibilidad de tener un desarrollo gradual de los sistemas de tratamiento para cumplir con la normativa nacional progresivamente. Los límites permisibles de calidad del efluente establecidos en el RVRAR se estarían cumpliendo en su totalidad hasta que estén en operación las unidades de tratamiento secundario (iniciando en la etapa intermedia de la PTAR), mejorando considerablemente la calidad del agua vertida (Jiménez, 2012).

Es de esperar que los parámetros de calidad del efluente no cumplan con la regulación durante la operación de la etapa I, principalmente: SST, DBO₅ y por ende DQO, pues para su efectiva remoción es indispensable realizar procesos de tratamiento biológico. Al incorporar el tratamiento secundario a partir de la etapa intermedia, se espera cumplir e incluso estar por debajo de los límites de la normativa.

Los Acuerdos de Junta Directiva del AyA (N°2006-512 y N°2006-587), resuelven que, según

cada etapa de la PTAR, el efluente tendrá que satisfacer estándares técnicos de calidad para descargar a los cuerpos receptores. La L.P.I. N°2008-0002-PRI solicita que, para el caso de los parámetros DBO₅ y SST, el límite de vertido de la tecnología de tratamiento secundario sea de 30 mg/l (ambos parámetros) (AyA, 2010) valor inferior al que solicita actualmente el RVRAR de 50 mg/l para estos dos parámetros.

El Cuadro 20 detalla los valores (o rangos) de los parámetros de calidad del efluente, establecidos como requisito según cada etapa del proyecto, indicado así en la L.P.I. N°2008-0002-PRI (AyA, 2010).

Cuadro 20. Calidad del efluente solicitada para el diseño de cada etapa de la PTAR Los Tajos

Parámetro	Etapa I	Etapa intermedia y etapa II
DBO _{5,20} (mg/l)	184	30
SST (mg/l)	145	30
pH	5 a 9	5 a 9
Temperatura (°C)	15 a 40	15 a 40
Grasa/aceites (mg/l)	30	30
Sólidos sedimentables (mg/l)	1	1
Sustancias activas al azul de metileno SAAM (mg/l)	5	5

Fuente: AyA, 2010.

El efluente tratado de la etapa I de la PTAR, está siendo descargado al Río Torres, el cual se encuentra al lado sur del terreno Tajo Sur. Dependiendo del emplazamiento que será establecido en el diseño final de la etapa intermedia, existe la posibilidad que el efluente sea vertido al Río Virilla, el cual colinda al norte con el terreno Tajo Norte (AyA, 2010).

4.3.4. Adjudicación del proyecto

El 21 de mayo del 2010 se da la apertura de la Licitación Pública Internacional N°2008-0002-PRI “*Diseño finales, construcción, equipamiento, pruebas, puesta en servicio y transferencia tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos*”. La Junta Directiva del AyA adjudicó la construcción en la modalidad “llave en mano” de la etapa I de la PTAR, a la empresa española Acciona Agua S.A.U., por un monto de US\$44.616.880,00 y un plazo de ejecución de 48 meses: 30 meses corresponden al proceso de diseño, construcción, equipamiento, puesta en servicio y transferencia tecnológica de la PTAR y 18 meses adicionales para la asistencia en la operación y mantenimiento (AyA, 2011).

El 12 de setiembre del 2012 se firmó el contrato (AyA, 2012) y la orden de inicio se emitió

el 01 de noviembre del 2012 (Fernández, 2014). En junio del 2015 la PTAR (con las unidades de tratamiento establecidas en la etapa I) inicia su operación con la puesta en marcha, recibiendo las aguas residuales de la parte norte de la ciudad de San José (Téllez, 2015). El acto oficial de inauguración se realizó el 10 de setiembre del 2015 (Avendaño, 2015).

4.3.5. Unidades de tratamiento de la etapa I de la PTAR

Las especificaciones de la L.P.I. N°2008-0002-PRI del AyA, indican que la construcción de la etapa I de la PTAR, corresponde únicamente a las unidades de: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento de olores y tratamiento completo de lodos con recuperación de energía.

Los principales componentes de la PTAR para la etapa I, según las especificaciones de la L.P.I. y el Plan Maestro presentado por Acciona Agua S.A.U. (2010), se describen a continuación:

- **Estructura de entrada del afluente y estructura de desfogue del efluente**

El emisario que recolecta el caudal total del agua residual a tratar, se conectará con la PTAR por medio de una estructura de entrada que garantice el ingreso de la totalidad del afluente. El efluente tratado desfogueará al río Torres mediante gravedad por medio de un cabezal de desfogue diseñado con una capacidad hidráulica para evacuar el caudal máximo horario del horizonte 2025 ($7,35 \text{ m}^3/\text{s}$).

- **Unidades de pretratamiento**

- **Pozo de gruesos:** Esta unidad permite retener los desechos voluminosos que ingresen por la estructura de entrada de la PTAR. Se diseñó con el caudal máximo de entrada en la etapa II. Cuenta con una cuchara bivalva que extraerá los sólidos de mayor tamaño, la cual viajará por medio de una grúa.

- **Vertedero de excedencias:** Estructura que se utilizará en condiciones particulares o de emergencia, cuando el afluente sobrepase el caudal estimado. El excedente del agua residual cruda se dirigirá lateralmente hacia una estructura de desvío (*by-pass*) que verterá el agua excedente al río Torres. Esta estructura cuenta con las correspondientes obras de protección de los márgenes del río para evitar erosión y socavación.

- **Desbaste:** Incluye un sistema con rejillas de: impacto, gruesos y finos. Las rejillas de impacto tienen una separación entre las barras de 100 mm, posteriormente rejillas gruesas con una separación 30 mm y rejillas finas con un tamiz de 6 mm. La extracción prevista es mecanizada y las rejillas son autolimpiantes. Los sólidos cribados de cada rejilla son extraídos y transportados automáticamente al contenedor para su desecho.

- **Desarenadores y Desengrase:** El desarenado y desengrase consiste en una obra mixta que retiene arenas y a la vez grasas, aceites y pequeños flotantes. El sistema consiste en canales mecanizados con rasquetas de fondo y de superficie. Las arenas se recogen en el fondo y se extraen mediante bombas. Las arenas extraídas serán lavadas previo a su disposición final y las aguas de este lavado serán incorporadas al sistema de tratamiento. Las grasas se eliminan mediante la emulsión por sistema de distribución de aire.

- Todas las unidades de pretratamiento están albergadas en un edificio cerrado para evitar propagación de olores. Los gases confinados en este edificio son tratados mediante el sistema de control de olores químico y biológico.

- **Unidades de tratamiento primario**

- **Tanques de sedimentación primarios:** Los tanques de sedimentación primarios serán de tipo lamelar con espesamiento y recirculación de lodos. Cuenta con una sección de dosificación de reactivos en caso que se requiera. En la parte inferior se sitúa un espesador de rasquetas (barrelodos) que concentran los lodos sedimentados. Llevan una cubierta como parte del control de olores.

- **Unidades de tratamiento de lodos**

- **Tamizado de lodos primarios:** Se realiza con el objetivo de eliminar sólidos y fibras que puedan afectar el proceso de espesamiento y digestión de lodos. Consiste en un tamiz en forma de tubería horizontal con: entrada, zona de conducción, tamizado, prensado y zona de descarga con un dispositivo cónico de regulación de presión.

- **Espesadores de lodos:** Se espesan tanto los lodos primarios como los lodos en exceso. El espesador de lodos primarios es de gravedad, mientras que para los lodos en exceso se mezcla entre espesamiento por gravedad y mecánico, mediante un disco filtrante giratorio que separa el lodo floculado del filtrado.
- **Almacenamiento y bombeo de lodos espesados:** Ya espesados los lodos primarios y los lodos en exceso se almacenan en un depósito de mezcla, que cuenta con un agitador sumergible para homogenizar el lodo mixto previo a la digestión.
- **Digestión de lodos:** El lodo espesado es bombeado a los digestores anaeróbicos, los cuales tienen una forma esbelta con cúpula y base troncopiramidal para homogenización del lodo, que incluye un sistema de calentamiento de lodos para la generación del biogás.
- **Almacenamiento de lodos digeridos:** El lodo digerido se almacena en un depósito tampón donde sufre una descomposición aproximada de un 45% de su materia volátil, produciendo principalmente gas metano y CO₂.
- **Deshidratación:** Se realiza automáticamente mediante centrífugas para obtener el 25% de sequedad del lodo. Previo a la deshidratación, el lodo es acondicionado químicamente, para lo cual requiere bombas dosificadoras del reactivo (polielectrólito).
- **Almacenamiento y evacuación de lodos:** Después de la deshidratación, los lodos son transportados mediante tornillos a los silos rectangulares de almacenamiento. Los silos de almacenamiento dispondrán de bocas de descarga para la llegada de los camiones recolectores.

- **Unidades de tratamiento de olores**

Los olores de los edificios y de las zonas cubiertas, se extraen mediante una red de ductos que conectan todos los procesos de emisión de olores (incluidos en el sistema de desodorización). El tratamiento de olores se realiza inicialmente por medio químico y posteriormente biológico, según los siguientes sistemas:

- **Tratamiento de desodorización químico:** se realiza mediante 2 columnas en serie con anillos que facilitan el intercambio de masa entre la fase líquida y gaseosa.
- **Tratamiento de desodorización biológico:** consta de un sistema de humectación (scrubber) y un medio filtrante de diferentes capas de corteza de árbol (astilla de Melina) el cual es inoculado con bacterias seleccionadas para tratar condiciones químicas del aire.

(Acciona Agua S.A.U., 2010)

Se solicitó en la licitación de la etapa I que, dentro del Plan Maestro de la oferta técnica, se planificara y reservara: el área, la carga hidráulica y orgánica requerida; dejando previstas las interconexiones necesarias para las futuras líneas de ampliación del tratamiento de la PTAR, sin que su funcionamiento se vea interrumpido durante las construcciones posteriores (AyA, 2010).

4.3.6. Unidades de tratamiento de la etapa intermedia y etapa II de la PTAR

Posterior a la etapa intermedia, las nuevas unidades de tratamiento a incorporar serán principalmente las que componen el tratamiento secundario. También, se construirán unidades adicionales de tratamiento primario, con el objetivo de aumentar su capacidad y cumplir con los requerimientos de tratamiento según los caudales proyectados en cada etapa, esto incluye las obras complementarias necesarias para interconectar las nuevas unidades de tratamiento con las existentes (de la etapa I) (AyA, 2010).

4.3.6.1. Estudios de diferentes sistemas para el tratamiento secundario de la PTAR

El estudio de factibilidad de 1998, realizado por la empresa GEOTÉCNICA, propone diferentes alternativas para el tratamiento secundario de la PTAR de la ciudad de San José. Posteriormente, en el estudio SAPROF (2004) se revisan a fondo las alternativas propuestas por GEOTÉCNICA, descartándose justificadamente la propuesta de un reactor anaerobio de flujo ascendente RAFA (UASB) seguido de un filtro aireado biológico (BAF). Se analizan y comparan tres diferentes sistemas de lodos activados: (1) lodo activado convencional, (2) lodo activado de alta tasa (HRAS) y (3) lodo activado de aireación extendida (LAE) (Equipo SAPROF, 2004).

El Cuadro 21 resume las principales ventajas, desventajas y otros aspectos comparativos (terreno necesario y consumo energético) de las tres variaciones de lodos activados que fueron analizadas en el estudio SAPROF.

Cuadro 21. Comparación de los procesos de tratamiento analizados en el Estudio SAPROF.

Ítem / Proceso	Lodo Activado Convencional	Lodo Activado de Alta Tasa	Lodo Activado con Aireación Extendida
Principio	Efluente de alta calidad alcanzable, 20/20 o menos.	Efluente de baja calidad 50/50.	Efluente de alta calidad alcanzable 20/20 o menos.
Ventajas	-Confiable -Muy estable -Efluente altamente tratado -Flexible	-Confiable. -Período de aeración más corto. -Requerimientos de terreno menores.	-Confiable -Se omite tratamiento primario -Efluente altamente tratado -Poca producción de lodos -Se estabiliza parcialmente lodos residuales
Desventajas	-Bajo nivel de estabilización en el lodo residual.	-Efluente de baja calidad. -Lodo residual fresco oloroso difícil de deshidratar. -Altas dosis de cal para estabilizar lodos. -El proceso depende considerablemente del reflujo de lodo para ayudar a floculación. -Las mejoras en la calidad del efluente requerirán inversión adicional. -Bombas grandes de reflujo de lodos.	-Grandes requerimientos de oxígeno. -Tanque de aeración de gran volumen. -Baja concentración de sólidos en el lodo residual. -Gran consumo de polímeros para deshidratar.
Complejidad	-Complejo -Operador entrenado	-Complejo -Operador entrenado	-Complejo -Operador entrenado
Costos de construcción	Intermedios	Bajos	Altos
Requerimiento comparativo de terreno (ha)	17,5	16,7	20,0
Primario (m²)	7.040	7.040	Ninguno
Biológico (m²)	15.600	4.506	41.350
Decantadores secundarios (m²)	11.232	14.651	16.889
Otros procesos	Igual	Igual	Igual
Energía necesaria para aeración (kW)	1.523	2.612	4.875
Requerimiento de oxígeno (kg/h)	3.150	3.133	5.845
Método de aeración	Burbujas finas difusas	Aireadores mecánicos	Aireadores mecánicos
Modelo de flujo	Gasto tipo pistón	Completamente mixto	Completamente mixto

Fuente: Equipo SAPROF, 2004.

Posteriormente, el equipo SAPROF evalúa por medio de una matriz comparativa los aspectos técnicos-económicos y ambientales más importantes: calidad del efluente, área necesaria, costo de construcción, condiciones ambientales, costos y dificultades de O&M, para obtener finalmente un valor ponderado y seleccionar la mejor alternativa de tratamiento. Esta información se muestra en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Matriz de evaluación de los procesos de tratamiento

Ítem / Proceso	Lodo Activado Convencional	Lodo Activado de Alta Tasa	Aireación Extendida
Calidad del efluente	3	1	3
Área necesaria	3	3	1
Costo de construcción	2	3	2
Costos de operación y mantenimiento	2	3	1
Dificultad de operación y mantenimiento	2	2	2
Condiciones ambientales	3	2	3
Total de la evaluación	15	14	12

Fuente: Equipo SAPROF, 2004.

Al analizar todos los aspectos anteriores, se determina por el equipo SAPROF, que la tecnología más adecuada para el tratamiento secundario de la PTAR de la ciudad de San José, es lodos activados convencionales. Este sistema se considera el más óptimo principalmente porque tendrá costos de construcción intermedios y costos energéticos bajos. Así mismo, es un sistema que comparativamente tiene mejores ventajas que los otros sistemas analizados en dicho estudio.

4.3.6.2. Aspectos del tratamiento secundario incluidos en la licitación de la etapa I

Dentro de la Licitación Pública Internacional N°2008-0002-PRI de la etapa I del proyecto, se solicitó a las empresas concursantes incluir en su Plan Maestro el prediseño hidráulico y sanitario del tratamiento secundario de la PTAR, mediante la tecnología de LAC (de flujo continuo) diseñado para el caudal de diseño de cada etapa (Cuadro 17). El diseño completo de la PTAR deberá incluir las provisiones necesarias para la futura expansión de la PTAR, incluyendo los requerimientos de la etapa intermedia y etapa II (aumento de caudal para el 2025) (AyA, 2010).

Así mismo, como parte de la Licitación, se solicitó a las empresas presentar una distribución espacial de los componentes, un diagrama de flujo y perfil hidráulico indicando claramente cuáles componentes se construirían en cada etapa del proyecto. Respecto al tratamiento secundario, en dicha Licitación se indica que se deberán considerar como mínimo, las siguientes unidades de tratamiento:

- 1. Tanques de aireación.** Rectangulares y con aireación por medio de burbuja fina para convertir la DBO soluble en biomasa (sólidos suspendidos volátiles).
- 2. Sedimentadores secundarios.** Tanques de sedimentación secundaria circulares

con barrelodos, decantación de los sólidos suspendidos, retiro de natas y espumas, y retiro de los sólidos en exceso para su tratamiento como lodo secundario.

3. Recirculación de lodos.

El capítulo V a continuación, detalla el prediseño de la propuesta de Acciona Agua S.A.U. mediante la tecnología de LAC, presentada en su Plan Maestro, como parte de la Oferta Técnica del proyecto en su etapa I.

CAPÍTULO V. DIMENSIONAMIENTO
DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO
MEDIANTE LAS TECNOLOGÍAS
LAC, IFAS Y MBR

CAPÍTULO V. DIMENSIONAMIENTO DEL TRATAMIENTO SECUNDARIO MEDIANTE LAS TECNOLOGÍAS LAC, IFAS Y MBR

5.1. Aspectos importantes a considerar en los prediseños del tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos

5.1.1. Parámetros de calidad del agua cruda y caudal del afluente

La Licitación Pública Internacional N°2008-0002-PRI del AyA, indica los parámetros de diseño de la etapa I, correspondientes a la calidad del agua cruda y al caudal que ingresaría a la PTAR. Los valores de calidad fueron obtenidos a través de las campañas de muestreo realizadas entre el 2000 y el 2002 (Cuadro 20). Los caudales (promedio y máximo) fueron obtenidos a través de proyecciones por parte de la Unidad Ejecutora AyA-JBIC en el 2008 (Cuadro 17).

Los dimensionamientos de las tres tecnologías estudiadas en este TFG, utilizaron como base los parámetros de calidad de agua cruda y caudal indicados en la L.P.I. Esto permite una comparación más equitativa entre las tecnologías.

5.1.2. Calidad físico-química del efluente solicitada

La entrada en operación de la etapa intermedia debe cumplir con el RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33061-MINAE-S). La L.P.I. N°2008-0002-PRI del AyA solicita los límites de vertido más estrictos que los solicitados en la regulación nacional, lo anterior para los parámetros de DBO₅ y SST. Los valores de calidad del efluente solicitados para cada una de las etapas de la PTAR, se mostraron anteriormente en el Cuadro 20.

5.1.3. Terreno disponible para la construcción de las unidades de tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos

Como se expuso en el capítulo IV, para la construcción de todas las etapas de la PTAR Los Tajos, se cuenta con dos terrenos: Tajo Sur y Tajo Norte. El primero inscrito como propiedad del AyA, mientras que el segundo está en proceso avanzado de adquisición (a agosto del 2017).

Los dos terrenos Los Tajos cuentan con una división física entre ellos, pues pasa la carretera

cantonal (Avenida 61) conocida como el Puente de Piedra, siendo ésta la única vía que comunica la Carpio con la Uruca. Un efectivo aprovechamiento de ambos lotes, implica realizar una conexión por medio de un túnel que atravesase el Puente de Piedra, aspecto que será considerado posteriormente en el análisis de costos de construcción de obras complementarias.

Es importante indicar que, los terrenos Los Tajos cuentan con muchos beneficios, principalmente características físicas, topográficas, climáticas y geográficas, favorables para la ubicación de la PTAR. Por este motivo, es muy importante que el área de terreno a utilizar sea optimizada, para contar con mayor espacio en caso de futuras ampliaciones por un posible aumento de la capacidad de tratamiento y del caudal a recibir.

5.2. Dimensionamiento del tratamiento secundario prediseñado: sistema de Lodos Activos Convencionales (LAC)

5.2.1. Introducción al prediseño de la tecnología de LAC

El proyecto de construcción de la PTAR en su etapa I fue adjudicado a la empresa española Acciona Agua S.A.U. (AyA, 2011). El cartel de la L.P.I. N°2008-0002-PRI del AyA solicita, como parte de la oferta técnica, incluir una propuesta del prediseño del tratamiento secundario mediante LAC, para iniciar en operación a partir de la etapa intermedia y que se extendería a la etapa II.

La empresa Acciona Agua S.A.U. incluye dentro de su Plan Maestro, el diseño preliminar de las unidades de tratamiento secundario, proponiendo su ubicación tanto en el terreno Tajo Norte como Tajo Sur.

5.2.2. Descripción del prediseño de la tecnología LAC realizado por Acciona Agua S.A.U.

- **Entrada al tratamiento biológico**

La entrada al tratamiento biológico es por medio de un colector de 2,4 m de diámetro que alimenta a un canal de reparto, el cual distribuirá el agua residual a cada reactor mediante

vertederos y compuertas motorizadas. Los lodos de retorno serán conducidos a la cabecera del tratamiento biológico con una razón R de 100%.

- **Tanque de aireación: reactor biológico**

Los módulos (tanques) que componen el reactor biológico se ubican en su totalidad en el terreno Tajo Sur. El prediseño propone 6 módulos para la etapa intermedia, mientras que para la etapa II se aumentaría a 2 módulos adicionales. Cada módulo tendrá una superficie de 1.062 m² y un volumen de 7.965 m³ con las siguientes dimensiones:

Cuadro 23. Dimensiones de cada módulo de reactor biológico según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.

Unidades dimensionales (por módulo)	Dimensionamiento (m)
Longitud	45
Ancho	23,6
Profundidad útil	7,5
Profundidad de construcción	8,5

Fuente: Plan Maestro Acciona Agua S.A.U., 2010.

La concentración de oxígeno disuelto en el reactor deberá ser mayor o igual a 2 mg/l.

- **Sedimentación Secundaria**

Acciona Agua S.A.U. propone para la etapa intermedia, 12 sedimentadores secundarios circulares (cilíndricos de base cónica), con un aumento de 4 sedimentadores adicionales para la etapa II. Todos los sedimentadores se ubicarían en el terreno Tajo Norte. Cada decantador tendrá una superficie de 1.661,90 m² y un volumen de 7.921,74 m³ con las siguientes dimensiones:

Cuadro 24. Dimensiones de cada sedimentador secundario según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.

Unidades dimensionales	Dimensionamiento
Diámetro	46 m
Altura parte cilíndrica	4 m
Altura de construcción	4,44 m
Pendiente parte cónica	10 %
Altura parte cónica	2,3 m

Fuente: Plan Maestro Acciona Agua S.A.U., 2010.

La Figura 27 muestra el emplazamiento en sitio de todas las unidades de tratamiento requeridas para la tecnología LAC, detallando por colores cada una de las etapas constructivas.

5.2.3. Análisis del prediseño de LAC realizado por Acciona Agua S.A.U. y comparación con otras metodologías de diseño

Al utilizar la metodología expuesta por Sperling (2007) para el diseño de la etapa biológica de tratamiento mediante LAC, se procede a analizar el dimensionamiento realizado por Acciona Agua S.A.U.

La metodología de diseño se basa en la remoción de la DBO, y para el caso específico de la PTAR Los Tajos, se omite la remoción biológica de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

5.2.3.1. Prediseño del reactor biológico

- **Edad del lodo (θ_c)**

La edad de lodo utilizada es de 4,52 días, el cual se encuentra cercano al valor inferior del rango típico para sistemas de LAC de 4 a 10 días (Sperling, 2007).

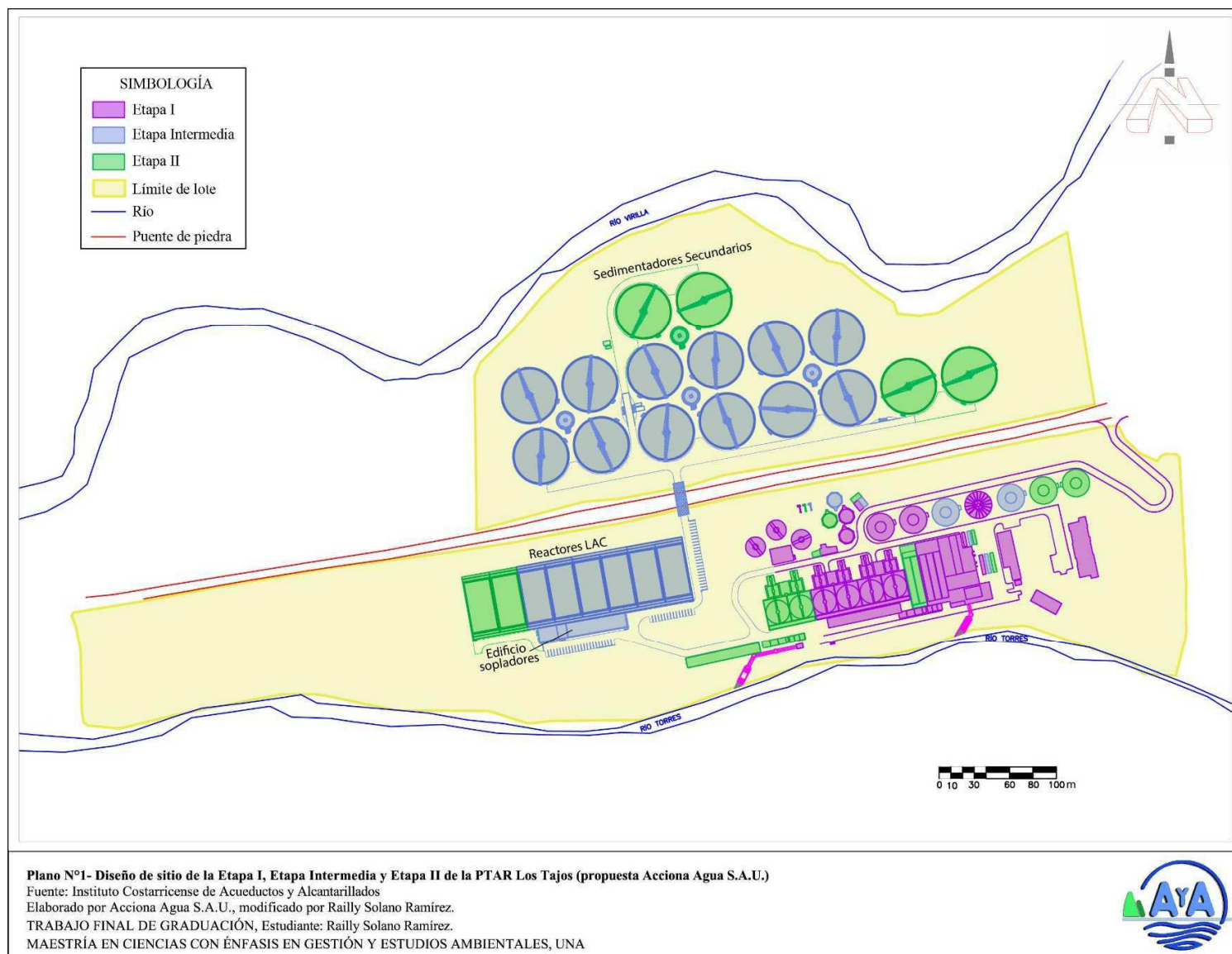


Figura 27. Diseño de sitio mediante la tecnología de LAC para la etapa I, etapa intermedia y etapa II de la PTAR Los Tajos (propuesta Acciona Agua S.A.U.)
Fuente: Adaptado de Acciona Agua S.A.U., 2010.

- **Sólidos Suspendidos Volátiles del Licor de Mezcla (SSVLM)**

El Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U. indica que la concentración de sólidos en el reactor es de 3,41 kg/m³, valor que corresponde a los sólidos suspendidos del licor de mezcla (SSLM). Conociendo la relación entre los sólidos suspendidos volátiles y los sólidos suspendidos totales (SSV/SS), es posible estimar los sólidos suspendidos volátiles en el licor de mezcla (SSVLM) mediante la siguiente ecuación:

$$SSVLM = SSLM * (SSV/SS) \quad [\text{Ec. 1}]$$

Suponiendo inicialmente una relación de SSV/SS=0,77 g/g (Sperling, 2007b), se obtiene el siguiente resultado:

$$SSVLM = 3.410 \text{ mg/l} * \left(0,77 \frac{\text{g}}{\text{g}}\right) = 2.626 \text{ mg/l}$$

Sin embargo, al realizar el cálculo bajo la metodología de Sperling, este valor de SSVLM (2.626 mg/l) no coincide con el dimensionamiento de las diferentes unidades de tratamiento secundario de la propuesta de Acciona Agua S.A.U. Lo que puede deberse a un conjunto de factores tales como: la aplicación de una metodología diferente de diseño, modelos de software modificados mediante la experiencia y criterio técnico para la selección de los parámetros de diseño.

Debido a esta divergencia, para este TFG se ha decidido utilizar el valor de SSVLM que se aproxime más al dimensionamiento del reactor propuesto por Acciona Agua S.A.U. A partir de un análisis iterativo, el valor estimado para el SSVLM fue de 1.800 mg/l. Este valor está en la parte inferior del rango típico para sistemas de LAC de 1.500 mg/l a 3.500 mg/l (Sperling, 2007b), por lo que se decide adoptarlo como válido.

Al suponer 1.800 mg/l como los SSVLM, es posible que algunos parámetros de diseño se vean modificados y difieran con la propuesta de Acciona Agua S.A.U., tratando de aproximarse a las dimensiones de las unidades de tratamiento propuestas por dicha empresa española.

- **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)**

El TRH estimado mediante la metodología de cálculo (de Sperling) es de 4,7 horas. Sin embargo, en el Plan Maestro presentado por Acciona Agua S.A.U., se indica un TRH de 3,41

h (etapa intermedia) y de 3,21 h (etapa II). Ninguno de los TRH se encuentra dentro del rango común de operación de sistemas de LAC, pues según Sperling, el rango óptimo para sistemas de LAC es de 6 a 8 horas, parámetro que afecta la degradación eficiente de componentes orgánicos solubles en el licor de mezcla.

- **Relación Alimento/Microorganismos: F/M (Food/Microorganism)**

El parámetro F/M ha sido estimado según los valores supuestos para el dimensionamiento de Acciona Agua S.A.U., el cual tiene un valor de 0,52 kg DBO₅/kg MLVSS·d. Según rangos típicos de sistemas de LAC, la relación F/M puede variar entre 0,3 y 0,8 kg DBO₅/kg MLVSS·d (Sperling, 2007, Vol.5). El valor estimado para el prediseño se encuentra dentro del rango de valores esperados para un sistema de LAC.

- **Componentes volátiles en los sólidos suspendidos (SSV/SS) y sólidos secundarios - en exceso- producidos por la remoción de DBO₅ (SS/Sr)**

Al realizar el cálculo de producción total de sólidos en el reactor (agua cruda + sólidos biológicos del proceso), se obtienen los valores de SSV/SS=0,768 g/g y SS/Sr=0,884 kg SS/kgDBO₅. Según la presencia de sólidos en el afluente, la existencia de sedimentación primaria, la edad del lodo y los parámetros cinéticos supuestos (Y y K_d), se interpolan los valores de SSV/SS y SS/Sr (Sperling, 2007b), y se obtienen las relaciones SSV/SS=0,77 g/g y SS/Sr=0,88 kg SS/kgDBO₅, los cuales se acercan a los valores estimados para el prediseño.

- **Razón de Retorno de Lodos (R)**

El Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U., se diseñó para una recirculación de lodos del 100%, lo que indica que la razón de retorno de lodos es 1. Este valor se encuentra dentro del rango típico para plantas de tratamiento ubicadas en regiones con climas cálidos, el cual es de R= 0,7 a 1,2 (Sperling, 2007b).

- **Eficiencia de la transmisión de oxígeno en los difusores (E-O₂)**

El rendimiento de oxigenación es considerado por Acciona Agua S.A.U. cerca del 23,18%. Este valor es específico según el tipo de difusor de aire, en este caso de burbuja fina.

5.2.3.2. Dimensionamiento de los sopladores

Acciona Agua S.A.U. indica que “el tratamiento biológico se realizará en líneas de lodos activos de media carga con aireación por difusores” (Acciona Agua S.A.U., 2010).

En el Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U., se muestran dos ecuaciones para el cálculo de las necesidades medias de oxigenación para DBO₅, las cuales se indican a continuación:

- Requerimientos de oxígeno para síntesis:

$$O_2 \text{ síntesis} = +0,5 + 0,01 \times \text{TRS} \quad [\text{Ec. 2}]$$

- Requerimientos de oxígeno para endogénesis:

$$O_2 \text{ endogénesis} = \frac{0,84 * b * SRT}{(1 + b * SRT)} \quad [\text{Ec. 3}]$$

- Requerimientos totales de oxígeno para DBO₅: O₂ síntesis + O₂ endogénesis

$$O_2 \text{ total} = O_2 \text{ síntesis} + O_2 \text{ endogénesis} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Analizando estas ecuaciones, para las cuales no se especifican referencias bibliográficas por parte de Acciona Agua S.A.U., se concluye que son relaciones entre el tiempo de retención del lodo (TRS) y coeficientes adaptados para ser utilizados en software de modelaje, para la obtención de los requerimientos de oxígeno en los tanques de aireación. Dichas ecuaciones arrojan los siguientes resultados:

- Requerimientos de oxígeno para síntesis: $2,50 \times 10^4$ kg O₂/día
- Requerimientos de oxígeno para endogénesis: $1,80 \times 10^4$ kg O₂/día
- Requerimientos totales (Q_{prom}) de oxígeno para DBO₅: $4,31 \times 10^4$ kg O₂/día
- Requerimientos totales (Q_{máx}) de oxígeno para DBO₅: $5,81 \times 10^4$ kg O₂/día

Los requerimientos medios de oxigenación para nitrificación y desnitrificación son cero, pues no se está considerando la remoción de nutrientes en el diseño biológico. Por esta razón, los requerimientos totales de oxígeno son únicamente para remoción de DBO.

Por medio de la metodología de Sperling, se obtienen resultados distintos para el cálculo de la aireación, pues las ecuaciones para obtener los requerimientos de oxígeno para síntesis y endogénesis son diferentes. Los resultados según las ecuaciones de Sperling son:

- Requerimientos de oxígeno para síntesis: $2,47 \times 10^4$ kg O₂/día
- Requerimientos de oxígeno para endogénesis: $7,23 \times 10^3$ kg O₂/día
- Requerimientos totales (Q_{prom}) de oxígeno para DBO₅: $3,19 \times 10^4$ kg O₂/día
- Requerimientos totales (Q_{máx}) de oxígeno para DBO₅: $3,92 \times 10^4$ kg O₂/día

Como se puede observar, al comparar los resultados entre sí, los requerimientos de oxígeno para síntesis son muy similares; sin embargo, para endogénesis varían considerablemente, alterando el resultado de requerimiento medio de oxígeno total. Es posible que estas diferencias se deban a relaciones entre coeficientes para su uso en software.

Acciona Agua S.A.U. propone dividir el tanque de aireación en cuatro zonas escalonadas (A, B, C y D) las cuales tendrán un porcentaje específico de inyección de aire por medio de difusores de membrana (burbuja fina), así como se muestra en el siguiente cuadro:

Cuadro 25. Distribución del porcentaje de aire en los tanques de aireación

Zona	Porcentaje de reparto de aire
A	37%
B	25%
C	19%
D	19%

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010

La estimación de Acciona Agua S.A.U. para determinar el caudal máximo de aire necesario en condiciones normales, es de 47.464 Nm³/h (etapa intermedia) y 67.810 Nm³/h (etapa II), el caudal medio de aire necesario sería de 34.209 Nm³/h (etapa intermedia) y 49.079 Nm³/h (etapa II). La cantidad de máquinas turbosoplantes serían: 6 activas y 1 de reserva (etapa intermedia) y 8 activas y 1 de reserva (etapa II). Para ambas etapas se adopta un caudal unitario individual para cada máquina de 8.600 Nm³/h, teniéndose un caudal total sin reservas de 51.600 Nm³/h (etapa intermedia) y 68.800 Nm³/h (etapa II).

5.2.3.3. Prediseño de los sedimentadores secundarios

El Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U. (2010) indica los valores de carga hidráulica y carga de sólidos (para caudal medio, máximo y punta), utilizados en el dimensionamiento preliminar de los sedimentadores secundarios para ambas etapas (Cuadro 26).

Cuadro 26. Carga hidráulica y carga de sólidos resultante según Acciona Agua S.A.U.

Caudal	Tasa de carga hidráulica (m ³ /m ² ·h)		Tasa de carga de sólidos (kg/m ² ·h) con recirculación	
	Etapla intermedia	Etapla II	Etapla intermedia	Etapla II
Promedio	0,52	0,59	2,61	2,97
Máximo	0,88	1,00	3,50	3,97
Punta	0,62	0,71	2,86	3,25

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

El Cuadro 27 presenta las tasas típicas de carga hidráulica y de sólidos basadas en la experiencia de expertos (Sperling, 2007b).

Cuadro 27. Rangos típicos de tasas de carga hidráulica y de sólidos para el diseño de los sedimentadores secundarios

Tecnología	Tasa de carga hidráulica (m ³ /m ² ·h)		Tasa de carga de sólidos (kg/m ² ·h)	
	Caudal promedio	Caudal máximo	Caudal promedio	Caudal máximo
Lodo activado convencional (LAC)	0,67 – 1,33	1,70 – 2,00	4,00 – 6,00	10,0
	0,67 – 1,20	1,70 – 2,70	4,00 – 6,00	-
Lodo activado de aireación extendida (LAE)	0,33 - 0,67	1,00 - 1,33	1,00 – 5,00	7,0

Fuente: Sperling, 2007b.

Al comparar las tasas de carga utilizadas por Acciona Agua S.A.U. (Cuadro 26), con las tasas típicas indicadas en referencias bibliográficas (Cuadro 27), se puede apreciar que todas las tasas utilizadas por Acciona Agua S.A.U. son menores al valor mínimo del rango recomendado por los expertos para el diseño de sedimentadores secundarios de la tecnología LAC, y algunas incluso, más bajas que las recomendadas para la tecnología de LAE. Esto implica resultados de áreas de sedimentación muy altas, resultando un prediseño muy conservador de los sedimentadores secundarios.

Aplicando las tasas del Cuadro 26, mediante la metodología de Sperling (2007b) se obtiene un área total para los tanques de sedimentación secundarios circulares de 19.584 m² (etapa intermedia) y de 25.993 m² (etapa II), con un diámetro de 45,6 m. Al adoptar un diámetro efectivo de 46 m, se obtienen las áreas y los volúmenes de los sedimentadores secundarios propuestos por Acciona Agua S.A.U., información que se resume en el Cuadro 28.

Cuadro 28. Cantidad de sedimentadores secundarios, áreas y volúmenes respectivos para las etapas intermedia y II, según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.

Variable del prediseño de sedimentadores secundarios	Etapla intermedia	Etapla II
Cantidad de sedimentadores	12	16
Área total (m ²)	19.943	26.590
Volumen total (m ³)	95.061	126.748

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

5.2.3.4. Producción de lodos

Los datos del Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U. indican que los sólidos producidos diarios en la etapa intermedia, serán 35.552 kg/d, con una concentración de 6,82 g/l mientras que en la etapa II, se calculan 56.016 kg/d, con una concentración de 6,42 g/l.

5.3. Prediseño mediante la tecnología de Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) para la PTAR Los Tajos

5.3.1. Implementación de la tecnología IFAS para la PTAR El Roble, Puntarenas

La PTAR de El Roble de Puntarenas (operada y administrada por el AyA), durante el 2014 fue objeto de una modificación en diseño e infraestructura con el propósito de mejorar la tecnología de tratamiento de aguas residuales empleada (LAC), aprovechando al máximo la infraestructura existente, para la obtención de una calidad satisfactoria del agua residual tratada, sin modificar el área de cobertura del alcantarillado sanitario. Dicha cobertura incluye los distritos de El Roble, Barranca, Chacarita y Puntarenas (SOLAMSA, 2014a) AyA, 2015).

El proyecto se realizó a partir de la Licitación Pública Nacional N°2013 LN-000020-PRI, en su Posición N°1 “Suministro, instalación y puesta en marcha de un sistema de tratamiento de aguas residuales bajo la modalidad IFAS (*Integrated Fixed-Film Activated Sludge System*) en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de El Roble, Puntarenas”, la cual fue adjudicada a la empresa Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA) (AyA, 2013).

Este proyecto modificó el sistema de tratamiento, pasando de la modalidad de lodo activado convencional a “lodo activado integrado con biopelícula en lecho móvil” (IFAS por sus siglas

en inglés), para lo cual fue necesario el equipamiento, la modificación de la infraestructura existente y la construcción de infraestructura complementaria (SOLAMSA, 2014a).

La PTAR El Roble se compone de las siguientes unidades de tratamiento: tamizado, sedimentación primaria, tanques de aireación y sedimentación secundaria. El sistema cuenta con dos módulos en paralelo (idénticos), donde cada uno recibe el 50% del total del agua residual recolectada en la red de alcantarillado sanitario existente, la cual es de tipo ordinario (AyA, 2016).

Ambos tanques de aireación fueron divididos en dos partes iguales por un muro divisorio (construido de fibra de vidrio), estableciéndose un volumen por cada sección de 234 m³. La primera mitad de los tanques corresponde al componente IFAS (con presencia de los biosoportos) y la segunda mitad corresponde al componente LAC (tanque de aireación sin biosoportos) (Figura 28) (Angappan, 2014).

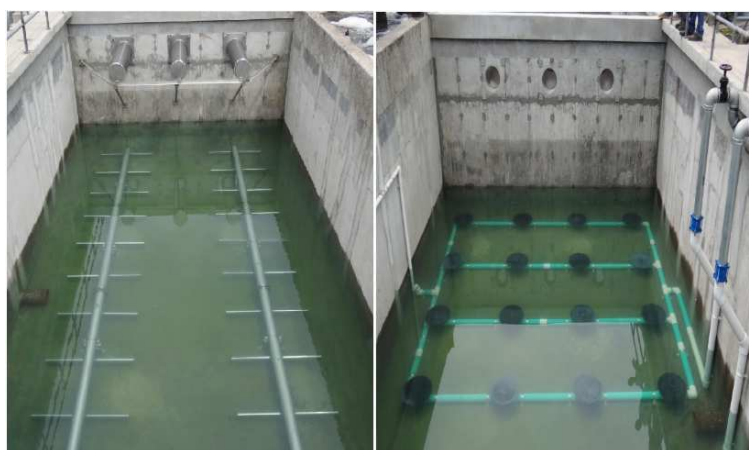


Figura 28. *A la izquierda:* Tanque IFAS con difusores de burbuja gruesa. *A la derecha:* Tanque LAC con discos difusores de burbuja fina. **Fuente:** SOLAMSA, 2014b.

Los muros divisorios cuentan en su base con rejillas planas de drenajes (de acero inoxidable) para mantener el nivel a ambos lados del muro durante los procesos de llenado o vaciado de los tanques. Así mismo, en la parte superior cada muro cuenta con 3 cilindros retenedores (construidos con material de rejilla fina) los cuales tienen el objetivo de permitir el flujo normal del licor de mezcla y a la vez impedir el paso de los biosoportos (Figura 29).



Figura 29. Muro divisorio y cilindros retenedores de biosoportes en el tanque IFAS
Fuente: SOLAMSA, 2014b.

Presentes los biosoportes en los tanques IFAS, los microorganismos tendrán mayor área superficial para crear colonias, aumentando su presencia en las aguas residuales aireadas, para una efectiva remoción de contaminantes. El biosoporte colocado es un medio plástico denominado *Active Cell 920*® desarrollado por la empresa Headworks Bio Inc (Figura 30) (SOLAMSA, 2014a).

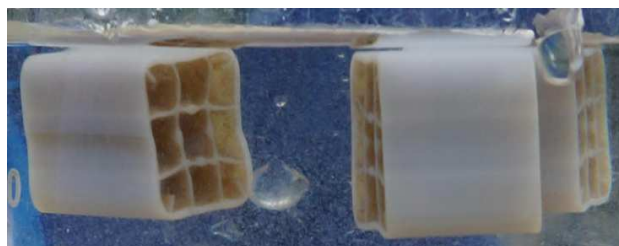


Figura 30. Biopelícula sobre el medio de soporte plástico de la PTAR El Roble
Fuente: AyA, 2016c.

El diseño realizado por Headworks Bio Inc. indica que la fracción de llenado de los biosoportes en el tanque IFAS corresponde al 35% del volumen del tanque, lo que implica un volumen de celdas plásticas de 82 m³ en cada sección. Los diseñadores indicaron un valor de sólidos suspendidos del licor de mezcla (SSLM) de 2.000 mg/l. El caudal de retorno de lodos fue diseñado a razón del 50%, para una producción de lodo de 60 m³/d.

Cada reactor (IFAS y LAC) requiere los volúmenes de aire que se muestran en el Cuadro 29.

Cuadro 29. Requerimientos de oxígeno propuestos por Headworks Bio Inc. para la PTAR El Roble

Reactor biológico	Requerimientos de aire (SCFM) a 20 °C y 5,4 psig
Biorreactor IFAS	1.220
Biorreactor LAC	280

Fuente: Headworks Bio Inc., 2016.

La Figura 31 presenta el diagrama de flujo del proceso IFAS para la PTAR de El Roble.

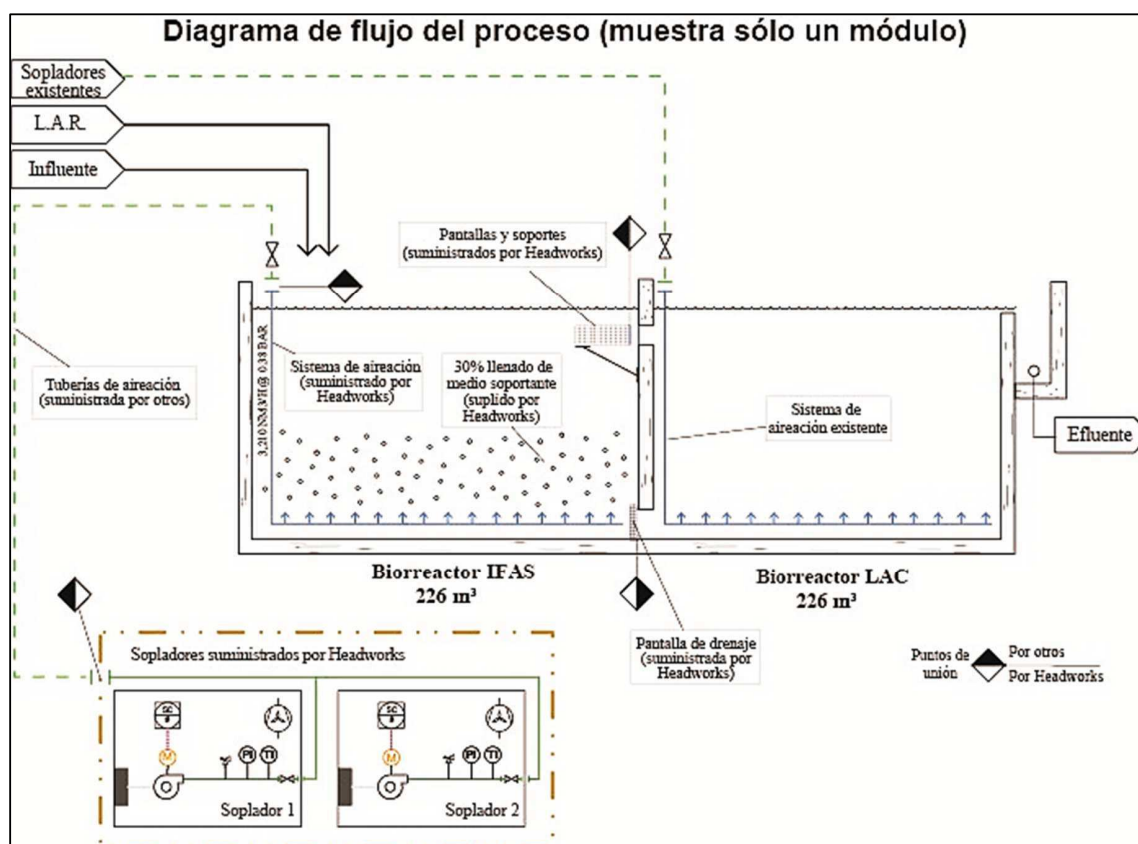


Figura 31. Diagrama de Flujo del Proceso IFAS en El Roble.

Fuente: SOLAMSA, 2014.

Al cambiar de tecnología de tratamiento, a nivel de cargas hidráulicas, actualmente la PTAR cuenta con la capacidad para tratar un caudal promedio diario de 80 l/s, mientras que con la tecnología LAC se trataba un caudal promedio diario de 55 l/s (Lazo y Araya, 2015).

Al analizar la capacidad de degradación de las cargas orgánicas, se aprecia una mejoría importante en el funcionamiento de la PTAR, pues según los resultados de análisis del Laboratorio Nacional de Aguas del AyA, posterior a la puesta en marcha de la aplicación de la tecnología IFAS, todos los parámetros de calidad del efluente se encuentran cumpliendo con los límites máximos permisibles establecidos en el RVRAR (D.E. N°33601-MINAE-S). El Cuadro 30 presenta los principales parámetros de análisis de la calidad del agua residual, evaluados antes y después de la implementación de la tecnología IFAS en la PTAR El Roble.

Cuadro 30. Principales parámetros de calidad del agua residual (afluente y efluente) evaluados de agosto del 2013 a agosto del 2016 en la PTAR El Roble.

N°	Fecha de muestreo	DBO (mg/l)		DQO (mg/l)		SST (mg/l)		SAAM (mg/l)	
		Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente	Afluente	Efluente
1	20/08/13	227	91	357	213	211	69	11,00	10,00
2	22/10/13	237	87	425	248	252	71	15,00	7,00
3	09/12/13	293	105	527	226	174	77	12,00	9,20
4	06/02/14	331	158	633	263	298	61	7,71	6,12
5	06/05/14	287	202	440	336	326	98	19,00	11,00
6	09/07/14	373	251	715	562	395	188	7,29	6,60
7	17/09/14	200	167	427	299	176	112	8,00	12,00
<i>Cambio de tecnología LAC a IFAS (noviembre del 2014)</i>									
8	04/03/15	321	20	576	60	197	31	9,70	1,60
9	10/06/15	267	42	508	79	161	28	9,00	0,54
10	13/08/15	309	30	497	59	181	11	9,60	1,00
11	21/10/15	322	25	619	48	233	26	15,00	0,86
12	01/03/16	237	27	486	58	174	42	14,00	0,64
13	18/05/16	338	37	923	71	450	32	15,00	0,56
14	17/08/16	272	29	584	61	194	18	14,00	1,39
Notas: Los valores indicados en color rojo indican incumplimiento de los límites máximos permitidos para el vertido de aguas residuales a cuerpo receptor (Tabla 4 del D.E. N°33601-MINAE-S).									

Fuente: AyA, 2016c.

Utilizando la información del Cuadro 30, para el período agosto del 2013 a agosto del 2016, se pueden calcular las eficiencias de remoción de los diferentes parámetros, información que se resume en el Cuadro 31.

Cuadro 31. Porcentajes promedio de remoción de los principales parámetros de calidad del efluente en la PTAR El Roble evaluados de agosto del 2013 a agosto del 2016.

Período de análisis	DBO (mg/l)	DQO (mg/l)	SST (mg/l)	SAAM (mg/l)
Tecnología LAC (agosto 2013 a setiembre 2014)	45,5%	38,9%	61,9%	15,4%
Tecnología IFAS (marzo 2015 a agosto 2016)	89,7%	89,2%	87,0%	91,9%

Fuente: AyA, 2016c.

Como se observa en el Cuadro 31, en el caso del DBO en promedio pasó de una eficiencia del 45,5% al 89,7%; para el DQO pasó de una eficiencia de 38,9% a 89,2%; en el caso de los SST pasó de tener una eficiencia del 61,9% a 87,0% y en los SAAM de 15,4% al 91,9%. Con estos valores, se puede concluir que el mejoramiento de la PTAR al modificar su tecnología fue efectivo.

5.3.2. Introducción al prediseño de la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos

La UEN de Recolección y Tratamiento de la Subgerencia de Sistemas Periféricos del AyA, en el 2013 realizó un estudio de mercado para el proyecto “Suministro, instalación y puesta en marcha de un sistema de tratamiento de aguas residuales bajo la modalidad IFAS en la PTAR de El Roble, Puntarenas”. Se determinó que la empresa Headworks Bio Inc. cuenta con una amplia experiencia en el desarrollo de las tecnologías de lecho móvil, tanto en la fabricación de biosoportos, como en la aplicación de la tecnología en proyectos de rehabilitación de PTARs existentes, así como en proyectos de PTARs nuevas.

El AyA tuvo una experiencia satisfactoria con el proyecto de la PTAR El Roble y con la empresa adjudicada, pues el producto y los servicios recibidos cumplieron con las expectativas. Así mismo, se tuvo un apoyo activo en todo el proceso de puesta en marcha del sistema (establecido en el cartel con una extensión de 20 días hábiles), incluyendo visitas y capacitaciones para el personal operativo de la PTAR. El año posterior a la implementación del proyecto (de noviembre 2014 a noviembre 2015), la empresa aún mostró un constante interés por conocer sobre el rendimiento de la PTAR El Roble, consultando sobre eficiencias en el tratamiento y problemas operativos que se hubieran presentado (Lazo, 2016).

Considerando positivo lo anterior, el prediseño del sistema IFAS de la PTAR Los Tajos para este TFG, fue solicitado a la empresa Headworks Bio Inc., el cual fue aportado por el M.B.A. Ing. Siva Angappan, director del departamento de Procesos de Ingeniería y Tecnología de dicha empresa.

5.3.3. Prediseño mediante la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos

El diseño de la tecnología IFAS se debe enfocar en el objetivo de tratamiento específico, ya sea: remoción de materia orgánica, nitrificación, desnitrificación, remoción de fósforo, o una combinación de las anteriores (WEF, 2011). El prediseño de la PTAR Los Tajos se realizó con el objetivo de remover el DBO del agua residual, mediante un sistema biológico de tipo IFAS.

El prediseño mediante la tecnología IFAS en la PTAR Los Tajos, fue basado en la Memoria de Cálculo presentada para el proyecto “Suministro, instalación y puesta en marcha de un sistema de tratamiento de aguas residuales bajo la modalidad IFAS en la PTAR de El Roble,

Puntarenas” (SOLAMSA, 2014), realizando las variaciones específicas para el caso en estudio. El prediseño sigue los procedimientos expuestos según Tchobanoglous et al. (2004), con algunas modificaciones producto del conocimiento adquirido por la experiencia en investigación y aplicación práctica de esta tecnología, por parte de los diseñadores de la empresa Headworks.

La metodología del prediseño mediante la tecnología de IFAS, se describe a continuación, iniciando con los parámetros de diseño, seguida de los cálculos para determinar el comportamiento de los reactores, específicamente los cálculos cinéticos (basados en las ecuaciones de Monod) y la aireación requerida (según la eficiencia de transferencia de oxígeno).

5.3.3.1. Parámetros de diseño para la tecnología de IFAS

Al analizar la escala de la PTAR Los Tajos, se propone el diseño de un sistema modular, donde todos los módulos (“trenes”) son de iguales dimensiones para un determinado caudal de diseño. Los módulos son de forma rectangular y están compuestos por dos secciones aireadas: un primer biorreactor IFAS (con biosoportos), seguido de un segundo biorreactor LAC (sin biosoportos), ambos compartimientos separados por medio de una pared divisoria con cilindros retenedores y rejillas de drenaje (Figura 29).

Un gran porcentaje de DBO se removerá en el biorreactor IFAS, mientras que en el biorreactor LAC se removerá un porcentaje menor. Los sistemas de tratamiento con la tecnología de IFAS pueden estar compuestos únicamente de biorreactores IFAS, sin biorreactores LAC. Sin embargo, para este caso en particular, se ha propuesto la existencia del biorreactor LAC principalmente por dos razones: (1) para reducción de costos en el sistema (realizando un balance de costos de biosoportos y área construcción), y (2) permitir una posible expansión del sistema en el futuro (más allá de la etapa II de este proyecto), sin la necesidad de construir módulos adicionales, únicamente trasladando la pared divisoria de manera que se aumente el área del biorreactor IFAS.

• Caudal de diseño por módulo (Q)

La escala de esta PTAR, favorece utilizar un caudal de diseño de 30.000 m³/d para cada módulo (Angappan, 2016).

Al distribuir el caudal promedio diario que ingresará a la PTAR en cada etapa, se requerirán 9 módulos para la etapa intermedia, mientras que para la etapa II se requerirán 4 módulos adicionales, siendo en total 13 módulos para la etapa II.

- **Dimensiones de los biorreactores (largo, ancho, profundidad, área y volumen)**

El prediseño de los biorreactores se realiza mediante un programa de modelado, el cual iterando selecciona los volúmenes óptimos para los reactores y el volumen de biosoportes a necesitar, de manera que se cumpla con los requerimientos de calidad del efluente solicitados.

Se ha establecido un módulo de forma rectangular, compuesto por dos biorreactores aireados (biorreactor IFAS y biorreactor LAC), separados por medio de una pantalla y cilindros retenedores. Cada uno de los biorreactores tendrá las dimensiones que se presentan en el Cuadro 32.

Cuadro 32. Dimensiones de cada módulo (biorreactor IFAS y biorreactor LAC) para la PTAR Los Tajos

Dimensiones (por cada módulo)	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad útil (m)	Área (m²)	Volumen (m³)
Biorreactor IFAS	20	8	7	128	896
Biorreactor LAC	12	8	7	96	672

Fuente: Headworks Bio, Inc., 2016.

Como se observa en el cuadro anterior, el biorreactor IFAS es 8 metros más largo que el biorreactor LAC, esto se debe a que en el biorreactor IFAS será donde se presente la mayor degradación de la materia orgánica, debido a la presencia de la biopelícula en los biosoportes. Esto implica que, este biorreactor deberá ser más grande en comparación al de LAC.

La altura real de los tanques es de 7,5 m pues deberán tener 0,50 m de borde libre. La profundidad útil de 7 m es elevada debido a dos razones principales: (1) tanques altos tienen mejor transferencia de oxígeno con menores requerimientos de aire, y (2) se busca tener la menor área superficial por módulo, lo que se traduce en menores costos constructivos y de espacio de terreno.

- **Volumen de biosoportes en el biorreactor IFAS ($V_{\text{biosoportes}}$)**

La fracción de llenado de los biosoportes, calculada según el programa de modelaje utilizado por la empresa, se determinó en 50% del volumen del biorreactor IFAS, lo que corresponde a un volumen de 560 m³ (por cada módulo).

- **Área superficial de los biosoportes ($AS_{\text{biosoporte}}$)**

La empresa Headworks Bio Inc. recomienda el uso de biosoportes tipo Active Cell 920®, los cuales tienen un área superficial de $680 \text{ m}^2/\text{m}^3$. El área superficial de los biosoportes para un único módulo de biorreactor IFAS, será específicamente:

$$AS_{\text{biosoporte}} = V_{\text{biosoporte}} * AS_{\text{ActiveCell920}} \quad [\text{Ec. 5}]$$

$$AS_{\text{biosoporte}} = 560 \text{ m}^3 \times 680 \text{ m}^2/\text{m}^3 = 380.800 \text{ m}^2 \text{ de área superficial}$$

- **Sólidos Suspendidos Volátiles en el Licor de Mezcla (SSVLM)**

El parámetro de SSVLM mide el rendimiento de los reactores IFAS, pues estima la biomasa activa, siendo ésta la que remueve el DBO en el agua residual. Comúnmente este parámetro corresponde al 80% de los SSLM.

$$SSVLM = SSLM \times 80\% \quad [\text{Ec. 6}]$$

$$SSLM = 2.000 \text{ mg/l (parámetro sugerido por Headworks Bio Inc.)}$$

$$SSVLM = 2.000 \text{ mg/l} * 80\% = 1.600 \text{ mg/l}$$

- **Índice Volumétrico de Lodos (IVL)**

El IVL mide el volumen de capa de lodo después de 30 min de sedimentación en el sedimentador secundario, lo que corresponde a la tasa de sedimentación según un tiempo estimado. Un rango típico es de 100 mg/l a 200 mg/l. A criterio del diseñador, se ha elegido un valor de 150 mg/l.

- **Tiempo de Retención Hidráulico (TRH)**

El tiempo de retención hidráulico se calcula con la siguiente ecuación:

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

V: volumen del reactor (m^3)

Q: caudal asignado al reactor (m^3/d)

Para obtener el TRH del módulo completo (biorreactor IFAS y biorreactor LAC) se suman los volúmenes individuales de la siguiente manera:

$$TRH = \frac{(V_{IFAS} + V_{LAC})}{Q}$$

$$TRH = \frac{(1.120 \text{ m}^3 + 672 \text{ m}^3)}{30.000 \text{ m}^3/\text{d}} \times 24 \text{ h/d}$$

$$TRH = 1,43 \text{ h (proceso completo)}$$

Debido a que se trabaja con aguas residuales municipales, para cumplir con el requisito de eliminación de la DBO, es suficiente con considerar una eficiencia en la remoción del 75% (en el proceso IFAS), lo que es posible mediante un bajo TRH.

Los tiempos de retención hidráulicos de cada sección del módulo se calculan con la ecuación [Ec.7], utilizando los volúmenes respectivos, dichos resultados se detallan a continuación:

▪ TRH_{IFAS}

$$TRH_{IFAS} = \frac{1.120 \text{ m}^3}{30.000 \text{ m}^3/\text{d}} \times 24 \text{ h/d} = 0,90 \text{ h (biorreactor IFAS)}$$

▪ TRH_{LAC}

$$TRH_{LAC} = \frac{672 \text{ m}^3}{30.000 \text{ m}^3/\text{d}} \times 24 \text{ h/d} = 0,53 \text{ h (biorreactor LAC)}$$

• **Tiempo de Retención del Sólido (TRS) o edad del lodo (θ_c)**

Debido a la presencia de biopelícula fija en los biosoportes, el parámetro de TRS no se aplica como un parámetro de diseño para este proceso, pues los procesos de biopelícula se diseñan basados en las tasas de carga y remoción (Angappan, 2016). A pesar de lo anterior, el tiempo de retención de sólidos (analizado para la sección suspendida del licor de mezcla), se estima aplicando la ecuación:

$$TRS = \frac{[SSVLM \times (TRH/24 \text{ h})]}{[(Y_h \times DBO) - (TRH/24 \text{ h}) \times SSVLM \times b_h]} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde los coeficientes cinéticos son $Y_h = 0,55$ y $b_h = 0,06$, según Tchobanoglous et al. (2004) y experiencia del diseñador.

$$TRS = \frac{[1.600 \text{ mg/l} \times (1,43 \text{ h} / 24 \text{ h})]}{[(0,55 \times 270 \text{ mg/l}) - (1,43 \text{ h} / 24 \text{ h} \times 1.600 \text{ mg/l} \times 0,06)]}$$

$$TRS = 0,67 \text{ d}$$

Como se observa, el valor del TRS es muy bajo, pues este tiempo no considera la acción de la biopelícula.

5.3.3.2. Prediseño de los biorreactores IFAS y LAC

Los principales cálculos para el dimensionamiento mediante la tecnología de IFAS se detallan a continuación. Los cálculos se realizan de manera individual para un módulo (o tren) compuesto por un biorreactor IFAS y un biorreactor LAC.

- **Lodo Activado de Retorno (LAR)**

El LAR es una fracción del caudal afluente. Es función del SSLM y el IVL. Se calcula de la siguiente manera:

$$LAR = \{1/[100/(SSLM/10.000 \times IVL) - 1]\}$$

[Ec. 9]

$$LAR = \{1/[100/(0,2000 \times 150 \text{ mg/l}) - 1]\} = 0,429$$

$$LAR = 42,9\%, \text{ conservadoramente } \sim 50\%$$

Resolviendo la ecuación [Ec. 9], el LAR será de 42,9% del caudal afluente. La empresa Headworks Bio Inc. recomienda utilizar en la práctica, un porcentaje del lodo activado de retorno (recirculación) del 50% para ser conservadores.

- **Concentración de sólidos en el LAR (X_{LAR})**

La concentración de sólidos se calcula en función del SSLM y el LAR de la siguiente manera:

$$X_{LAR} = SSLM * \left[1 + \left(\frac{1}{LAR}\right)\right]$$

[Ec. 10]

$$X_{LAR} = 2.000 \text{ mg/l} * \left[1 + \left(\frac{1}{0,429}\right)\right]$$

$$X_{LAR} = 6.667 \text{ mg/l}$$

La concentración de sólidos en el lodo de retorno (LAR) será de 6.667 mg/l.

- **Caudal de Lodos Activados de Desecho (Q_{LAD})**

El caudal de lodos de desecho se calcula en función del SSLM, la cual es la biomasa total que contribuye al volumen del lodo. Este valor se calculó de la siguiente manera:

$$Q_{LAD} = \frac{[SSLM * (V_{IFAS} + V_{LAC})]}{(TRS * X_{LAR})} \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$Q_{LAD} = \frac{[2.000 \text{ mg/l} * (1.120 \text{ m}^3 + 672 \text{ m}^3)]}{(0,67 \text{ d} * 6.667 \text{ mg/l})}$$

$$Q_{LAD} = 803,06 \frac{\text{m}^3}{\text{d}} \text{ (para un tren completo)}$$

- **Cinética del biorreactor IFAS**

Tanto el crecimiento de la biopelícula fija, como el crecimiento en suspensión de la biomasa, se realizan simultáneamente en el biorreactor IFAS. Ambas fases (fija y en suspensión) presentan la oxidación de DBO. En este caso, por criterios de diseño, se asume que la remoción de carga orgánica en el biorreactor IFAS será la mitad en cada una de las fases, lo que significa que 50% se deberá a la presencia de la biopelícula, y el otro 50% debido a la fase suspendida.

Debido a que el biorreactor IFAS requiere una mezcla intensa y una dinámica agitación de los biosoportes, éste se modela como un “reactor de flujo continuo de mezcla completa” (FCMC), donde la concentración de DBO en el tanque es la misma del efluente.

El cálculo de la remoción de DBO, aplica las ecuaciones del modelo de “Monod”, las cuales se presentan a continuación:

- **Tasa de carga por área superficial de biosoportes ($TCAS_{\text{biosoportes}}$)**

La tasa de carga por área superficial (TCAS) en el biorreactor IFAS, se calcula a partir del DBO de entrada a dicho biorreactor (después del sedimentador primario), el caudal de diseño del módulo y el área superficial del biosoporte, mediante la siguiente expresión:

$$TCAS = \frac{DBO_{entrada} * Q_{módulo}}{AS_{biosoporte}} \quad [Ec. 12]$$

Donde:

$Q_{módulo}$: caudal asignado al módulo: 30.000 m³/d.

$AS_{biosoporte}$: área superficial de los biosoportes: 380.800 m².

$DBO_{entrada}$: concentración de DBO que ingresa al biorreactor IFAS, proveniente del tratamiento primario. Según Tchobanoglous et al. (2004), la eficiencia en la remoción de DBO en tratamiento primario es del 25% al 40%. Para ser conservadores, se seleccionó el menor porcentaje, por lo que la $DBO_{entrada}$ será de 202,5 mg/l.

$$TCAS = \frac{202,5 \frac{mg}{l} * 30.000 m^3/d}{380.800 m^2}$$

$$TCAS = 15,95 \frac{g}{m^2 \cdot d}$$

El modelo de diseño de la empresa Headworks Bio Inc., indica que únicamente el 50% de la TCAS se le aplica a la fase de la biopelícula, obteniéndose la $TCAS_{biosoporte}$ mediante la siguiente ecuación:

$$TCAS_{biosoporte} = TCAS * \%_{biopelícula} \quad [Ec. 13]$$

$$TCAS_{biosoporte} = 15,95 \frac{g}{m^2 \cdot d} * 50\%$$

$$TCAS_{biosoporte} = 7,98 \frac{g}{m^2 \cdot d}$$

Así mismo, la carga orgánica en la biopelícula será el 50% de la DBO de entrada al biorreactor IFAS (posterior al sedimentador primario).

$$DBO_{biopelícula} = DBO_{entrada} * \%_{biopelícula} \quad [Ec. 14]$$

$$DBO_{biopelícula} = 202,5 \frac{mg}{l} * 50\%$$

$$DBO_{biopelícula} = 101,3 \frac{mg}{l}$$

- Tasa de remoción de DBO (r_A) y carga orgánica resultante de la fase de biopelícula ($DBO_{efl-biosop.}$)

El cálculo de la tasa de remoción de DBO (r_A) y la concentración de DBO a la salida de este biorreactor ($DBO_{efl-biosop.}$), para la fase de biopelícula dentro del biorreactor IFAS, requiere solucionar simultáneamente las siguientes dos ecuaciones con dos incógnitas:

$$(1) \quad r_A = \frac{r_{A-max} * DBO_{efl-biosop.}}{(DBO_{efl-biosop.} + K_{hs})} \quad [Ec. 15]$$

$$(2) \quad r_A = \frac{TCAS_{biosop} * [DBO_{biopelícula} - DBO_{efl-biosop.}]}{(DBO_{biopelícula})} \quad [Ec. 16]$$

Donde:

r_A = tasa de remoción de DBO en la fase biopelícula (g/m²/d)

r_{A-max} = tasa máxima de remoción de DBO por la biopelícula = 15,00 g/m²/d (a 20 °C)

$DBO_{biopelícula}$ = carga orgánica en la biopelícula (50% de la DBO de entrada al biorreactor IFAS) = 101,3 mg/l

$DBO_{efl-biosop.}$ = DBO del efluente (o del sustrato) debido al proceso de la biopelícula (mg/l)

K_{hs} = coeficiente de saturación media del sustrato = 10,00 mg/l (a 20 °C)

$TCAS_{biosop}$ = tasa de carga por área superficial de biosoportres (g/m²/d)

Aplicando la corrección por temperatura ($\theta=1,073$), se obtienen los siguientes resultados:

$$r_{A-max} = 17,27 \text{ g/m}^2/\text{d (a 22 °C)}$$

$$K_{hs} = 11,51 \text{ mg/l (a 22 °C)}$$

Las ecuaciones a resolver son las siguientes:

$$(1) \quad r_A = \frac{17,27 \frac{g}{m^2 \cdot d} * DBO_{efl-biosop.}}{(DBO_{efl-biosop.} + 11,51 \text{ mg/l})}$$

$$(2) \quad r_A = \frac{15,95 \frac{g}{m^2 \cdot d} * [101,3 \text{ mg/l} - DBO_{efl-biosop.}]}{(101,3 \text{ mg/l})}$$

Dando como resultado los siguientes valores para las dos variables incógnitas:

$$r_A = 7,31 \frac{g}{m^2 \cdot d}$$

$$DBO_{efl-biosop.} = 8,45 \text{ mg/l (debido a la fase de la biopelícula)}$$

- Tasa de remoción de DBO en la fase suspendida ($U_{DBO-susp}$)

La tasa de remoción de DBO en la fase suspendida ($U_{DBO-susp}$) se determina mediante la siguiente expresión:

$$U_{DBO-susp} = \left[\frac{(u_h - b_h)}{F.S. * Y_h} \right] * \left[\frac{DBO_{efl-final}}{K_s + DBO_{efl-final}} \right] \quad [\text{Ec. 17}]$$

Los coeficientes cinéticos a 20 °C son $u_h = 3,55$, $b_h = 0,06$, $Y_h = 0,55$ y $K_s = 60 \text{ mg/l}$, según Tchobanoglous et al. (2004) y experiencia del diseñador. Aplicando la corrección por temperatura a 22 °C: $u_h = 4,09$, $b_h = 0,06$, $Y_h = 0,55$ y $K_s = 60 \text{ mg/l}$.

El factor de seguridad (F.S.) es una recomendación de los expertos en diseño de sistemas IFAS, de la empresa Headworks Bio Inc., se sugiere utilizar un valor de 1,7.

Utilizando una calidad de DBO solicitada en el efluente ($DBO_{efl-final}$) de 30 mg/l, se obtiene la siguiente tasa de remoción de DBO en la fase suspendida:

$$U_{DBO-susp} = \left[\frac{(4,09 - 0,06)}{1,7 * 0,55} \right] * \left[\frac{30 \text{ mg/l}}{(60 \text{ mg/l} + 30 \text{ mg/l})} \right]$$

$$U_{DBO-susp} = 1,43 \frac{g \text{ DBO}}{g \text{ SSVLM} \cdot d}$$

-DBO removida en la fase suspendida del biorreactor IFAS ($DBO_{rem-susp}$)

Conociendo la tasa de remoción de DBO en la fase suspendida del biorreactor IFAS, es posible determinar la cantidad de $DBO_{rem-susp}$ con la siguiente expresión:

$$DBO_{rem-susp} = U_{DBO-susp} * SSVLM * \frac{TRH_{IFAS}}{24h} \quad [\text{Ec. 18}]$$

$$DBO_{rem-susp} = 1,43 \frac{g \text{ DBO}}{g \text{ SSVLM} \cdot d} * 1.600 \frac{mg}{l} * \frac{0,90h}{24h}$$

$$DBO_{rem-susp} = 85,7 \text{ mg/l}$$

Sabiendo que el 50% resultante del DBO de entrada al biorreactor IFAS (posterior al sedimentador primario) corresponde a la concentración de DBO de entrada para la fase en suspensión ($DBO_{suspensión}$), cuyo valor es 101,3 mg/l y el DBO efluente de la fase de biopelícula ($DBO_{efl-biosop}$) es de 8,45 mg/l, la suma de ambas concentraciones corresponde a la concentración disponible para el proceso de degradación en la fase en suspensión, dicho valor corresponde a 109,7 mg/l.

El valor de $DBO_{rem-susp}$ resultante de la ecuación [Ec. 18] es inferior al disponible para la degradación, lo que implica que no todo el DBO será removido en la fase en suspensión del biorreactor IFAS, sino que tendrá una concentración remanente, la cual se calcula a continuación para corroborar si cumple con la calidad de DBO solicitada en el efluente (30 mg/l).

- Carga orgánica resultante de la fase suspendida del biorreactor IFAS ($DBO_{efl-susp}$)

La concentración de DBO resultante de la fase en suspensión ($DBO_{efl-susp}$) se calcula de la siguiente manera:

$$DBO_{efl-susp} = DBO_{suspensión} - DBO_{rem-susp} \quad [Ec. 19]$$

$$DBO_{efl-susp} = 101,3 \frac{mg}{l} - 85,7 \frac{mg}{l} = 15,6 \frac{mg}{l}$$

- Carga orgánica resultante del biorreactor IFAS: $DBO(sol)_{efl-IFAS}$

El cálculo de DBO al salir del biorreactor IFAS es basado en el componente soluble. El componente particulado del DBO se asume que es eliminado posteriormente, por medio de la clarificación en el sedimentador secundario. El criterio del diseñador indica que, tanto en el biorreactor IFAS como en el LAC, no se remueve el componente particulado de la biomasa, sólo el soluble.

La concentración de DBO (soluble) a la salida del biorreactor IFAS se obtiene de la siguiente expresión:

$$DBO(sol)_{efl-IFAS} = DBO_{efl-biosop.} + DBO_{efl-susp.} \quad [Ec. 20]$$

$$DBO(sol)_{efl-IFAS} = 8,45 \text{ mg/l} + 15,6 \text{ mg/l}$$

$$DBO(sol)_{efl-IFAS} = 24,0 \text{ mg/l}$$

El resultado anterior, implica que la concentración de $DBO_{soluble}$ a la salida del biorreactor IFAS, tendrá una concentración de 24,0 mg/l. Adicionalmente, para darle más robustez al sistema, posterior al biorreactor IFAS, se recomienda un segundo biorreactor, pero sin biosoportos (biorreactor LAC), como un factor de seguridad que aumente la capacidad para soportar los picos de caudal, o en caso que posteriormente se requiera aumentar la capacidad de degradación de la materia orgánica o la remoción biológica de nutrientes.

El prediseño debe cumplir con la solicitud del cartel de licitación respecto a la calidad del DBO_{total} (incluida soluble y particulada), indicada menor a los 30mg/l, siendo necesario que posterior a los módulos de los biorreactores, se coloquen los sedimentadores secundarios, donde se removerá la materia particulada. La empresa Headworks Bio Inc. indicó en el prediseño, que a la salida de todo el sistema IFAS se garantiza una concentración de DBO_{total} , menor a los 30,0 mg/l.

- Porcentaje de eficiencia en la remoción de DBO en el sistema IFAS (% DBO_{rem})

El porcentaje de eficiencia de todo el sistema IFAS se obtiene con la siguiente ecuación:

$$\% DBO_{rem} = \frac{(DBO_{entrada} - DBO_{efl-IFAS}) * 100}{DBO_{entrada}} \quad [Ec. 21]$$

$$\% DBO_{rem} = \frac{(202,5 \text{ mg/l} - 30,0 \text{ mg/l}) * 100}{202,5 \text{ mg/l}} = 85,2\%$$

• Requerimientos de aire en el biorreactor IFAS

- Requerimientos Reales de Oxígeno (RRO)

$$RRO = \frac{(razón \text{ de } O_2 * DBO_{afl} * Q * \%DBO_{rem})}{(24 * 1.000)} \quad [Ec. 22]$$

Donde:

Razón de O₂= 1 kgO₂/kgDBO_{rem}

Porcentaje de remoción de DBO_{final} esperado= 85,2 %

$$RRO = \frac{(1 * 202,5 \text{ mg/l} * 30.000 \text{ m}^3/\text{d} * 85,2\%)}{(24 * 1.000)} = 215,6 \text{ kg} \frac{\text{O}_2}{\text{h}}$$

- Requerimientos de Oxígeno en condiciones Estándar (SOR)

$$RRO = \frac{SOR * \{ \alpha * [(\beta * Corrección_{prof} * C_T) - OD_{residual}] * \theta^{T-20} \}}{C_{sat20}} \quad [\text{Ec. 23}]$$

$$SOR = \frac{RRO * C_{sat20}}{\{ \alpha * [(\beta * Corrección_{prof} * C_T) - OD_{residual}] * \theta^{T-20} \}} \quad [\text{Ec. 24}]$$

Donde:

α : coeficiente de transferencia de masa de aguas residuales a agua potable: 0,80

β : factor de corrección por la presencia de sólidos disueltos que reducen la solubilidad del oxígeno: 0,95

Corrección_{prof} (corrección de profundidad): $[1 + \text{profundidad de los difusores de aire (6,85 m)}/100] = 1,069$ (corrige la concentración de oxígeno disuelto de saturación en la profundidad de los difusores)

OD_{residual}: concentración de oxígeno disuelto en el agua residual procedente del biorreactor IFAS: 3 mg/l para la oxidación de la DBO (4 mg/l en caso de nitrificación)

θ : factor de corrección de temperatura= 1,024

T: temperatura máxima de operación de las aguas residuales (°C) = 23,8 °C

C_{sat20}: nivel de saturación del oxígeno disuelto superficial en mg/l a 20 °C y a la profundidad de los difusores de aire = 9,02 mg/l

C_T : nivel de saturación del oxígeno disuelto superficial en mg/l a la temperatura y elevación de diseño. Se supondrá 8,7 mg/l (a 22 °C).

Utilizando todos los factores anteriores, se obtiene el siguiente valor de SOR:

$$SOR = \frac{215,6 \text{ kg } O_2/h * 9,02 \text{ mg/l}}{\{0,80 * [(0,95 * 1,069 * 8,7 \text{ mg/l}) - 3 \text{ mg/l}] * 1,024^{(23,8-20)}\}}$$

$$SOR = 381,0 \text{ kg } O_2/h$$

- **Requerimientos de aire para el biorreactor IFAS**

$$\text{Requerimientos de aire} = \frac{SOR * F.S.}{(\rho_{aire} * \%O_2 * Prof_{difusores} * \%T.E.)} \quad [\text{Ec. 25}]$$

Donde:

ρ_{aire} = Densidad del aire en condiciones estándar = 1,2 kg/m³

%O₂ = Porcentaje de Oxígeno en el aire = 23% gO₂/g aire

%T.E. = Eficiencia de Transferencia de difusores (burbuja gruesa) = 3,12%/m

Prof_{difusores} = Profundidad de inmersión de los difusores = 6,85 m

F.S. = 1,36 (recomendado por Headworks Bio Inc.)

$$\text{Requerimientos de aire} = \frac{381,0 \text{ kg } O_2/h * 1,36}{(1,2 \text{ kg/m}^3 * 23\% * 6,85 \text{ m} * 3,12\% / \text{m})}$$

$$\text{Requerimientos de aire} = 9,04 \times 10^3 \text{ m}^3/h \text{ (biorreactor IFAS)}$$

- **Requerimientos de aire para el biorreactor LAC**

Debido a que la materia orgánica ya fue degradada en el biorreactor IFAS, en el biorreactor LAC únicamente se requiere aire para mezcla, aspecto que se calcula en el siguiente punto.

- **Requerimientos de aire para mezcla (de ambos biorreactores)**

Tanto para el biorreactor IFAS como para el biorreactor LAC, se requiere una determinada cantidad de aire para batir el licor de mezcla. La cantidad de aire para mezcla en ambos

biorreactores se obtiene a partir del Índice de Mezcla del Biorreactor (IMB) y es estimado por la siguiente ecuación:

$$\text{Aire aplicado para mezcla} = \text{IMB} * \text{Volumen}_{\text{biorreactor}} \quad [\text{Ec. 26}]$$

Los rangos de mezcla óptima sugeridos en la literatura para un sistema de aireación tipo red, donde los difusores están instalados uniformemente en el fondo del tanque, son de 10 a 15 m³ de aire/ 10³ min·m³ de volumen del tanque (Tchobanoglous et al., 2004). Por parte de la empresa Headworks Bio Inc., tanto para IFAS como para MBBR, utilizan un rango de IMB bajo condiciones estándar (20 °C y 1 atmósfera) de 2,0 a 3,0 m³de aire/h por m³ de volumen del tanque.

Aplicando el valor mayor del rango estándar recomendado por los expertos en esta tecnología, para cada uno de los biorreactores se obtienen los siguientes resultados:

- Biorreactor IFAS:

$$\text{IMB}_{\text{IFAS}} = \frac{3,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\text{m}^3} * 1.120 \text{ m}^3 = 3,36 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

- Biorreactor LAC:

$$\text{IMB}_{\text{IFAS}} = \frac{3,0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}{\text{m}^3} * 672 \text{ m}^3 = 2,02 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{h}$$

Los resultados anteriores permiten concluir que, el aire a suplir en el biorreactor IFAS para la oxidación del DBO (9,04 x 10³ m³/h) es suficiente para la mezcla, por lo que no requerirá aire adicional al calculado anteriormente. Sin embargo, para el biorreactor LAC, se deberá aportar aire de mezcla de 2,02 x 10³ m³/h.

5.3.3.3. Prediseño de los sedimentadores secundarios

La tecnología de IFAS, al igual que la de LAC, requerirá de sedimentación secundaria para reducir la cantidad de sólidos suspendidos y con esto, clarificar el efluente. Este proceso se ubica posterior a los módulos de biorreactores.

El dimensionamiento de los sedimentadores secundarios se realizó siguiendo el procedimiento expuesto por Sperling (2007b), determinando el área de superficie requerida

según las tasas de cargas hidráulicas y cargas de sólidos, para el caudal promedio y el caudal máximo.

Se consideraron los valores intermedios de los rangos típicos de cargas hidráulicas y cargas de sólidos indicados por Sperling (presentados anteriormente en el Cuadro 27), y considerando la recirculación de lodos del 50%. El Cuadro 33 indica los valores utilizados de cargas hidráulicas y cargas de sólidos para dicho prediseño.

Cuadro 33. Carga hidráulica y de sólidos propuestos para el prediseño de la tecnología IFAS

Caudal	Carga hidráulica (m ³ /m ² ·h)	Carga de sólidos (kg/m ² ·h)
Promedio	0,80	5,00
Máximo	1,80	10,00

Fuente: Sperling, 2007b.

Como resultado de la aplicación de dicha metodología, se proponen sedimentadores secundarios circulares de alimentación central (cilíndricos de base cónica) con las características que se indican en el Cuadro 34.

Cuadro 34. Dimensiones de los sedimentadores secundarios prediseñados para la tecnología IFAS

Unidades dimensionales	Dimensionamiento
Diámetro (m)	46
Altura parte cilíndrica (m)	4,5
Altura parte cónica (m)	2,3
Altura de construcción (m)	6,8
Pendiente parte cónica (%)	8

La cantidad de sedimentadores, su área y su volumen, tanto para la etapa intermedia, como para la etapa II, se presentan en el Cuadro 35.

Cuadro 35. Cantidad de sedimentadores secundarios, áreas y volúmenes respectivos para las etapas intermedia y II, según el prediseño mediante la tecnología IFAS

Variable	Etapla intermedia	Etapla II
Cantidad de sedimentadores	8	12
Área total (m ²)	13.295	19.943
Volumen total (m ³)	67.983	101.974

5.3.3.4. Producción de lodos

Según los datos del prediseño de IFAS y la cantidad de trenes por cada etapa, los sólidos producidos diarios en la etapa intermedia, son de 48.186 kg/d, con una concentración de 6,67 g/l mientras que en la etapa II, se producirán 69.599 kg/d, con una concentración similar.

5.3.4. Resumen del prediseño mediante la tecnología IFAS

El Cuadro 36 presenta un resumen de los principales parámetros de diseño mediante la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos.

Cuadro 36. Resumen de parámetros de diseño para la tecnología IFAS (datos por módulo)

Parámetro	Biorreactor IFAS	Biorreactor LAC
SSLM	2.000 mg/l	
TRS	0,67 d	
TRH	1,43 h	
OD	3 mg/l	2 mg/l
Razón de retorno “R”	50% del QPD	
Requerimientos de oxígeno	7.038 m³/h	1.980 m³/h

Fuente: Heaworks Bio Inc., 2016.

El Cuadro 37 resume el resultado del dimensionamiento de las diferentes unidades de tratamiento mediante la tecnología IFAS.

Cuadro 37. Cantidad de unidades de tratamiento y dimensiones para la tecnología IFAS

Descripción	Etapla intermedia	Etapla II
Biorreactores		
Cantidad de módulos de biorreactores (trenes)	9	13
Dimensiones del biorreactor IFAS	Largo: 20 m, Ancho: 8 m, Profundidad útil: 7 m	
Dimensiones del biorreactor LAC	Largo: 12 m, Ancho: 8 m, Profundidad útil: 7 m	
Sedimentadores Secundarios		
Cantidad de sedimentadores secundarios	8	12
Dimensiones de los Sedimentadores	Diámetro: 46 m, Altura parte cilíndrica: 4,5 m	

Fuente: Heaworks Bio Inc., 2016.

La Figura 32 muestra un esquema de la ubicación de los biorreactores de la tecnología de IFAS del prediseño para la PTAR Los Tajos.

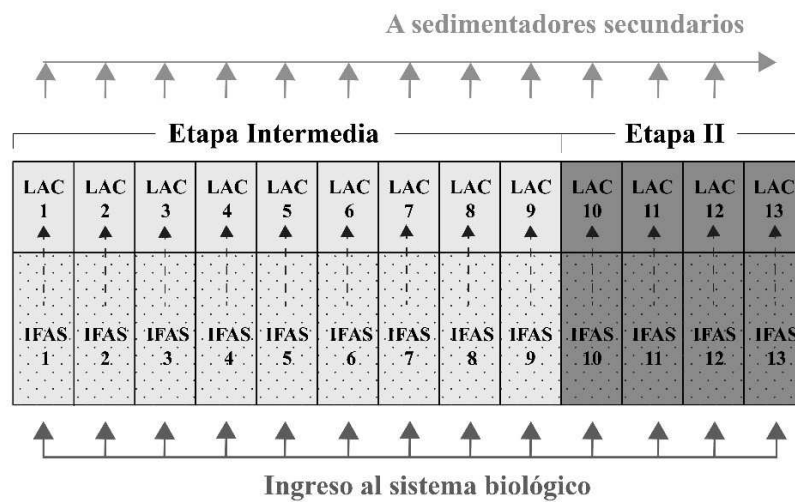


Figura 32. Diagrama que ejemplifica el dimensionamiento de los biorreactores de la tecnología IFAS

Fuente: Datos de Headworks Bio Inc., 2015.

El emplazamiento en sitio de todas las unidades de tratamiento requeridas para la tecnología IFAS, se muestra en la Figura 33, detallando por colores cada una de las etapas constructivas.

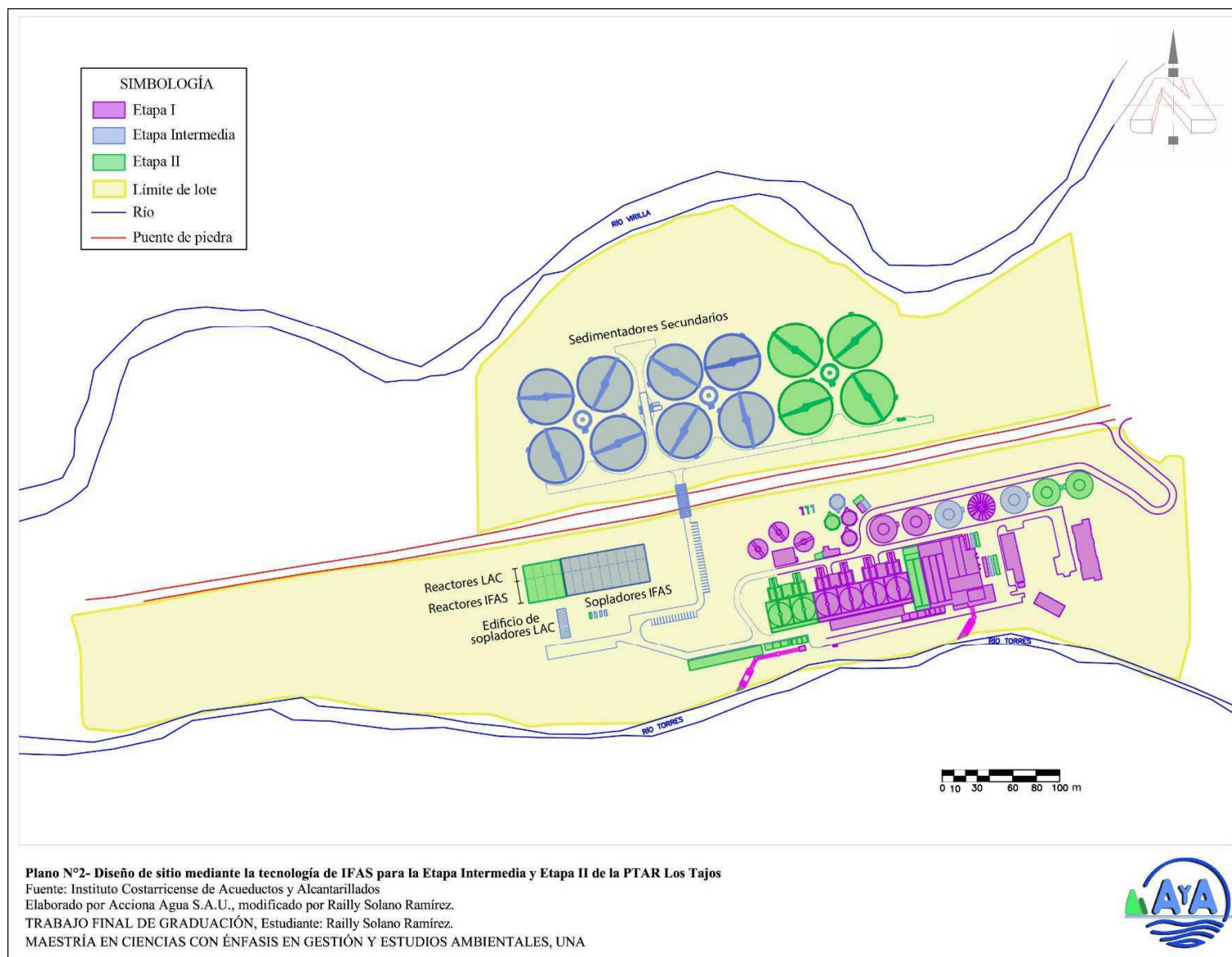


Figura 33. Diseño de sitio mediante la tecnología de IFAS para la etapa intermedia y etapa II de la PTAR Los Tajos
Fuente: R. Solano (2016), Headworks Bio. Inc. (2016), Acciona Agua S.A.U. (2010).

5.4. Prediseño mediante la tecnología de Biorreactores de Membrana (MBR) para la PTAR Los Tajos

5.4.1. Introducción al prediseño de la tecnología MBR

Como parte de esta investigación, se contactaron a diferentes proveedores de sistemas MBR: GE Power & Water (Zenon), Hyflux, Koch Membrane System, Kubota, Membran Filtrations Technik GmbH (MFT), Microdyn Nadir y Evoqua Water Technologies (Evoqua).

De todos los proveedores anteriores, únicamente la empresa Evoqua brindó aportes técnicos para el dimensionamiento del sistema MBR, así como una cotización preliminar en caso que se implemente esta tecnología.

La empresa Evoqua, anteriormente del grupo SIEMENS, cuenta con una línea de productos específicos para tecnologías de membrana, conocida con el nombre de Memcor®, la cual tiene más de 30 años de aplicación municipal e industrial en el mundo (Evoqua, 2015).

Como parte intrínseca del diseño de la tecnología MBR, se considera la remoción de nutrientes por medio de nitrificación/desnitrificación. Por lo que en el diseño biológico se contemplará parte anóxica y parte aeróbica.

5.4.2. Configuración del sistema y tipo membrana seleccionados

La configuración óptima para la PTAR Los Tajos, por sus características de tratamiento de aguas residuales municipales y su escala, es la de MBR con membrana sumergida o inmersa (sMBR), específicamente el sistema sumergido externo (e-sMBR), el cual está compuesto por un tanque exclusivo para el tratamiento biológico, y un segundo compartimiento para el tratamiento de filtración por membranas.

El tipo de membrana recomendado es la membrana de fibra hueca (*Hollow Fiber: HF*), la cual tiene una dirección de flujo filtrado de afuera hacia adentro, y opera dentro del rango de la ultrafiltración. La empresa Evoqua recomienda el modelo B40N, con el cual es posible retener partículas de hasta 0,04 μm , incluyendo microorganismos (virus, bacterias, entre otros). Otras características específicas del modelo de membrana propuesta se encuentran resumidas en la Figura 34.



Figura 34. Especificaciones del módulo de membrana seleccionado
Fuente: Adaptado de Evoqua, 2015.

La Figura 35 muestra un ejemplo de la configuración e instalación de los módulos de la membrana dentro del tanque.

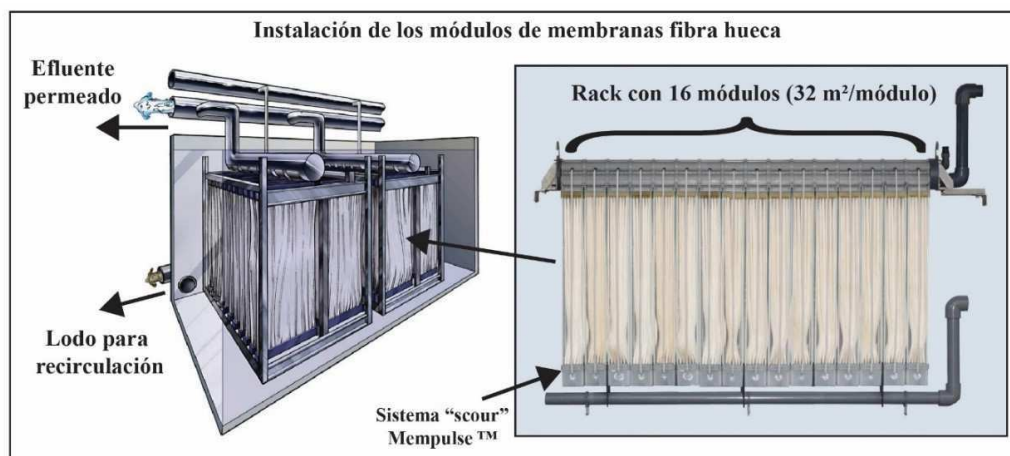


Figura 35. Configuración de los módulos de membrana para un sistema MBR sumergido.
Fuente: Adaptado de Evoqua, 2015 y "The MBR Site", 2016.

5.4.3. Prediseño biológico para la tecnología de MBR

El diseño biológico del MBR no es muy diferente de un diseño para LAC que incluya remoción de nutrientes, donde se distinguen diferentes parámetros para la zona aeróbica y para la zona anóxica.

La empresa Evoqua ha recomendado, para el caso específico de la PTAR Los Tajos, que el sistema esté compuesto por 4 trenes de tratamiento biológico, por lo que el caudal promedio diario se dividirá en 4 partes iguales, siendo $Q = 6,07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$.

Los parámetros biocinéticos que se recomiendan utilizar para el diseño de la tecnología MBR, son valores típicos aplicables de sistemas de LAC (Judd, 2011), los cuales se detallan a continuación:

Cuadro 38. Parámetros biocinéticos para el diseño biológico del MBR

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor recomendado	Unidad
Coefficiente de rendimiento heterotrófico	Y	0,40	g VSS/ g DBO
Tasa máxima de crecimiento específico de bacterias heterotróficas	μ_m	6,00	g VSS/ g VSS-d
Coefficiente de decaimiento endógeno heterotrófico	k_e	0,12	g VSS/ g VSS-d
Coefficiente de saturación (heterotrófico)	K_s	20,00	g DBO/ m^3
Coefficiente de rendimiento por nitrificación	Y_n	0,12	g VSS/ g DBO

Fuente: Adaptado de Judd, 2011.

5.4.3.1. Cálculos de parámetros biológicos para la zona aeróbica

- Tasa específica de crecimiento de bacterias para nitrificación (μ_n)

$$\mu_n = \left[\frac{\mu_{n,m} * N_e}{(K_n + N_e)} \right] * \left[\frac{DO}{(K_o + DO)} \right] - K_{e,n} \quad [\text{Ec. 27}]$$

Donde:

$\mu_{n,m}$ = Tasa específica máxima de crecimiento de bacterias para nitrificación

N_e = Concentración de amonio en el efluente

K_n = Coeficiente de saturación media por nitrificación

K_o = Coeficiente de saturación media por oxígeno

DO = Oxígeno disuelto en el tanque aeróbico

$K_{e,n}$ = Coeficiente de muerte de bacterias por nitrificación

Dentro de las solicitudes de calidad del efluente, para el caso de Costa Rica, no se regula para aguas residuales domésticas el LMP de nitrógeno, amonio o amoniaco; sin embargo, para este caso, se indicará un valor de NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl) esperado en el efluente de 1,0 mg/l. Asumiendo que el nitrógeno orgánico se transformará en amonio (Sperling, 2007),

éste valor corresponderá al parámetro N_e . El oxígeno disuelto se recomienda en 2,0 mg/l (Judd, 2011).

El Cuadro 39 resume los valores asumidos para los diferentes parámetros biológicos.

Cuadro 39. Parámetros biológicos para el diseño por nitrificación

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor recomendado	Unidad
Tasa específica máxima de crecimiento de bacterias para nitrificación	$\mu_{n,m}$	0,75	g VSS/ g VSS-d
Coefficiente de saturación media por nitrificación	K_n	0,74	-
Coefficiente de muerte de bacterias por nitrificación	$k_{e,n}$	0,08	g VSS/ g VSS-d
Coefficiente de saturación media por oxígeno	K_O	0,55	mg/l

Fuente: Adaptado de Judd, 2011.

Aplicando los anteriores valores, la tasa específica de crecimiento de bacterias para nitrificación (μ_n) tendrá un valor de 0,26 gVSS/ gVSS-d.

- **Tiempo de retención del lodo o edad del lodo para la zona aeróbica ($\theta_{x,aer}$)**

La edad del lodo aeróbica ($\theta_{x,aer}$) se calcula a partir de la μ_n y un factor de seguridad (F.S.), que según Sperling (2007b), puede estar entre 1,5 y 2,5. Se selecciona F.S. de 2,0 para ser conservador.

$$\theta_{x,aer} = \frac{F.S.}{\mu_n} \quad [\text{Ec. 28}]$$

$$\theta_{x,aer} = \frac{2,0}{0,26} = 7,7 \text{ días}$$

- **DBO efluente (S_e)**

La DBO esperada en el efluente se calcula según la siguiente ecuación:

$$S_e = \frac{[K_s * (1 + k_e * \theta_{x,aer})]}{[\theta_{x,aer} * (\mu_n - k_e) - 1]} \quad [\text{Ec. 29}]$$

$$S_e = 0,87 \text{ mg/l}$$

- **Producción de lodos en la zona aeróbica ($M_{X,bio}$)**

La producción de lodos en la zona aeróbica se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$M_{x,bio} = \left[\frac{Q * Y * (S - S_e)}{(1 + k_e * \theta_{x,aer})} \right] + \left[\frac{f_d * k_e * Q * Y * (S - S_e) * \theta_{x,aer}}{(1 + k_e * \theta_{x,aer})} \right] + \left[\frac{Q * Y_n * (NO_x)}{(1 + k_e * \theta_{x,aer})} \right] \quad [\text{Ec. 30}]$$

Donde:

Q= Caudal promedio diario (por cada tren: 60.696 m³/d)

S= Valor de DBO del afluente (270 mg/l)

f_d= Fracción de la biomasa que permanece como restos celulares. Judd (2011) indica que la f_d estará en el rango de 0,10 – 0,15. En este caso se asume un valor de 0,10g VSS/g sustrato.

NO_x = Concentración de NTK oxidado a nitrato. Judd (2011) indica que será aproximadamente el 80% del valor del NTK del afluente (0,8 * 30 mg/l= 24 mg/l).

Con los valores anteriores, se obtiene un valor de M_{x,bio}= 3.808,3 kg VSS/d.

- **Fracción de partículas biodegradables del DQO (bpDQO) y total de partículas del DQO (pDQO)**

Ambas fracciones del DQO se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$bpDQO = f_{bp} * DQO_{afl} \quad [Ec. 31]$$

$$pDQO = (f_{bp} * f_{up}) * DQO_{afl} \quad [Ec. 32]$$

Donde:

DQO_{afl}= DQO del afluente (675 mg/l)

f_{bp} y f_{up} = corresponden a las partículas biodegradables y no biodegradables del DQO respectivamente, las cuales se presentan en el siguiente cuadro:

Cuadro 40. Parámetros de las fracciones biodegradables y no biodegradables del DQO

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor asumido (adimensional)
Fracción de biodegradación lenta del DQO	f _{bp}	0,50
Fracción de partículas no biodegradables del DQO	f _{up}	0,25

Fuente: Adaptado de Judd, 2011.

Con estos valores, ambas fracciones del DQO resultan:

$$bpDQO = 337,5 \text{ mg/l}$$

$$pDQO = 506,25 \text{ mg/l}$$

- **Sólidos Suspendidos Volátiles no biodegradables en el afluente (nbVSS)**

A partir de las fracciones de DQO (biodegradable y no biodegradable) y el valor de los VSS ($0,78 * TSS = 226,2 \text{ mg/l}$), se obtienen los VSS no biodegradables con la siguiente ecuación:

$$nbVSS = \left(1 - \frac{bpDQO}{pDQO}\right) * VSS \quad [\text{Ec. 33}]$$

$$nbVSS = 75,4 \text{ mg/l}$$

- **Producción total de lodos ($M_{x,TSS}$)**

La producción de lodos de todo el proceso se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$M_{x,TSS} = \left(\frac{M_{x,bio}}{0,85}\right) + Q * (nbVSS + iTSS) \quad [\text{Ec. 34}]$$

Donde:

$iTSS$ = Sólidos Suspendidos Totales Inertes ($TSS - VSS = 63,8 \text{ mg/l}$)

$$M_{x,TSS} = 13.331 \text{ kg TSS/d}$$

- **Concentración de SSLM en zona aeróbica (X_{aer})**

La concentración de SSLM en la zona aeróbica se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$X_{aer} = \frac{X_m * r_{mr}}{(1 + r_{mr})} \quad [\text{Ec. 35}]$$

Donde:

X_m = Concentración de SSLM en el tanque de membranas, sugerida por Evoqua en 7.700 mg/l

r_{mr} = Razón de recirculación de la membrana, sugerida por Evoqua en $r_{mr}=2,5$.

$$X_{aer} = 5.500 \text{ mg/l}$$

Este valor de SSLM, a pesar de ser mayor a los 5.000 mg/l (límite máximo recomendado en sistemas de LAC por Sperling, 2007b) es el sugerido por ingenieros de la empresa Evoqua, quienes debido a su experiencia realizan algunas modificaciones a la metodología de diseño teórica presente en las referencias bibliográficas.

- **Volumen del tanque aeróbico (V_{aer})**

El volumen correspondiente a la zona aeróbica, se calcula de la siguiente manera:

$$V_{aer} = M_{x,TSS} * \frac{\theta_{x,aer}}{X_{aer}} \quad [\text{Ec. 36}]$$

$$V_{aer} = 18.785 \text{ m}^3$$

- **Tiempo de retención hidráulico para la zona aeróbica (TRH_{aer})**

El TRH aeróbico se obtiene a partir del volumen de la parte aeróbica y el caudal promedio diario, con la siguiente ecuación:

$$TRH_{aer} = \frac{V_{aer}}{Q} \quad [\text{Ec. 37}]$$

$$TRH_{aer} = \frac{18.785 \text{ m}^3}{60.696 \text{ m}^3/\text{d}}$$

$$TRH_{aer} = 7,4 \text{ h}$$

- **Caudal de lodos de desecho (Q_w)**

El caudal de lodos de desecho para un tren se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_w = \frac{V_{aer}}{\theta_{x,aer}} \quad [\text{Ec. 38}]$$

$$Q_w = 2.424 \text{ m}^3/\text{d}$$

Los cuatro trenes del tratamiento biológico tendrán un caudal total de desecho de 9.695,5 m³/d.

- **Tasa de recirculación del nitrato (r_{int})**

La concentración de SSLM en la zona aeróbica se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$r_{int} = \left(\frac{NO_x}{NO_e} \right) - 1 \quad [\text{Ec. 39}]$$

Donde:

NO_e = Concentración de nitrato en el efluente. Judd (2011) lo estima en 12,0 mg/l.

Finalmente, se obtiene una tasa de recirculación de nitrato de:

$$r_{int} = 1,0 \text{ mg/l}$$

- **Requerimientos de Oxígeno Totales (Mo)**

Los requerimientos de oxígeno total (por tren) se obtienen a través de la siguiente ecuación:

$$M_o = Q * (S - S_e) - 1,42 M_{x,bio} + 4,33 * Q * NO_x - 2,86 * Q * (NO_x - NO_e) \quad [\text{Ec. 40}]$$

$$M_o = 20.560 \text{ kg } O_2/d$$

5.4.3.2. Cálculos de parámetros biológicos para la zona anóxica

- **Concentración de SSLM en zona anóxica (X_{anox})**

La concentración de SSLM en la zona aeróbica se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$X_{anox} = X_{aer} * \frac{r_{int}}{(1 + r_{int})} \quad [\text{Ec. 41}]$$

$$X_{anox} = 2.750 \text{ mg/l}$$

- **Tiempo de retención del lodo o edad del lodo para la zona anóxica ($\theta_{x,anox}$)**

El tiempo de retención de lodo para la zona anóxica es un valor que debe asumirse con criterio técnico. Se asume 4,6 días por recomendación de Evoqua.

- **Volumen del tanque anóxico (V_{anox})**

El volumen correspondiente a la zona anóxica, se calcula de la siguiente manera:

$$V_{anox} = M_{x,TSS} * \frac{\theta_{x,anox}}{X_{anox}} \quad [\text{Ec. 42}]$$

$$V_{anox} = 22.300 \text{ m}^3$$

- **Tiempo de retención hidráulico para la zona anóxica (TRH_{anox})**

Similar al TRH aeróbico, el TRH anóxico se obtiene a con la siguiente ecuación:

$$TRH_{anox} = \frac{V_{anox}}{Q} \quad [\text{Ec. 43}]$$

$$TRH_{anox} = \frac{22.300 \text{ m}^3}{60.696 \text{ m/d}}$$

$$TRH_{anox} = 8,82 \text{ h}$$

- **Concentración de biomasa activa en la zona anóxica ($X_{b,anox}$)**

La concentración de biomasa activa en la zona anóxica, se calcula de la siguiente manera:

$$X_{b,anox} = \left[\frac{Q * \theta_{x,aer}}{V_{anox}} \right] * \left[\frac{Y * (S - S_e)}{(1 + k_e * \theta_{x,aer})} \right] * \left[\frac{r_{int}}{(r_{int} + 1)} \right] \quad [\text{Ec. 44}]$$

$$X_{b,anox} = 588,3 \text{ gTSS/m}^3$$

- **Carga de nitrato en la zona anóxica (NO-carga)**

La carga de nitrato en la zona anóxica se calcula mediante la ecuación:

$$NO_{carga} = \frac{[Q * r_{int} * (TKN_{afl} - N_e - 0,12 * M_{x,bio})]}{Q} \quad [\text{Ec. 45}]$$

$$NO_{carga} = 1.760,2 \text{ kg/d}$$

- **Relación Alimento/Microorganismos en zona anóxica (F/M_b)**

La relación de alimento por biomasa activa en la zona anóxica se obtiene de la siguiente manera:

$$F / M_b = \frac{Q * S}{(V_{anox} + X_{b,anox})} \quad [\text{Ec. 46}]$$

$$F / M_b = 1,25 \frac{\text{gDBO}}{\text{gTSS} \cdot \text{d}}$$

- **Capacidad de Desnitrificación (NO_r)**

La capacidad de desnitrificación se obtiene de la siguiente manera:

$$NO_r = V_{anox} * SDNR * X_{b,anox} \quad [\text{Ec. 47}]$$

Donde:

SDNR: (“*Specific Denitrification Rate*”) Tasa específica de desnitrificación que se obtiene a partir de Tchobanoglous et al. (2004), utilizando el valor de F/M_b obtenido anteriormente. En este caso $SDNR = 0,28 \text{ g NO}_3^- \text{-N /gVSS-d}$.

Aplicando los valores calculados anteriormente, se tiene una capacidad de $\text{NO}_r = 3.673,3 \text{ kg/d}$.

5.4.3.3. Producción de lodos etapa biológica

Los lodos de desecho en un sistema de MBR, se extraen del tanque de aireación (tanque biológico), pues no cuentan con sedimentadores secundarios. Utilizando el dato de producción de lodos calculado para un tren (M_x, TSS) de $13.331,4 \text{ kg TSS/d}$, se tiene que para la etapa intermedia se producirán 53.326 kgTSS/d , mientras que para la etapa II se producirán 79.988 kgTSS/d .

La empresa Evoqua señala como parámetro de diseño, un valor de producción de biosólidos para la etapa intermedia de 60.276 kg/d , dato que cuenta con una diferencia de aproximadamente 7.000 kg/d con respecto al valor estimado mediante el prediseño realizado. Para contar con un prediseño más conservador, se utilizará el dato más crítico de los dos, el cual es el aportado por la empresa Evoqua.

No se cuenta con un dato de la empresa para la etapa II, por lo que a razón de aumento del caudal y según el comportamiento de las dos tecnologías anteriores, se estimará una producción de lodos de 90.414 kg/d .

5.4.3.4. Resumen del prediseño biológico para el proceso completo

Sumando los resultados obtenidos en las zonas aeróbica y anóxica, se obtienen los resultados para un tren completo, los cuales se resumen en el Cuadro 41.

Cuadro 41. Resumen de resultados para el diseño biológico de la tecnología MBR (1 tren)

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor
Tiempo de retención del lodo total (d)	$\theta_{x, \text{proc}}$	12,35
Volumen total del proceso - 1 tren (m^3)	V_{proc}	41.085
Tiempo de retención hidráulico total (h)	TRH_{proc}	16,25

El diseño del sistema de membranas está normalmente excluido del diseño biológico, pues son dos sistemas independientes. Se considera que el lodo al llegar al tanque de membranas, ya ha logrado el tratamiento biológico. Además, el volumen total y los tiempos de residencia de los tanques de membrana son muy pequeños en comparación con el sistema biológico.

El único aspecto biológico en el que podrían intervenir los tanques de membranas, es que contribuyen a la re-aireación del licor de mezcla, en caso de ser necesario la adición de oxígeno posterior a una zona anóxica.

Las dimensiones propuestas para el sistema biológico de la tecnología MBR se muestran en el Cuadro 42.

Cuadro 42. Dimensiones para un tren del sistema biológico de la tecnología MBR

Dimensiones	Largo (m)	Ancho (m)	Profundidad (m)	Volumen (m³)
Zona aeróbica	36,6	27,4	6,1	6.117
Zona anóxica	36,6	27,4	6,1	6.117

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

5.4.4. Prediseño del sistema de membranas para la tecnología MBR

5.4.4.1. Dimensionamiento del tanque de membranas

El prediseño de los módulos de membrana se realizó utilizando un caudal promedio diario total de la PTAR, de $Q = 242.784 \text{ m}^3/\text{d}$, para la etapa intermedia.

- **Flujo por unidad de área ($J_{\text{net, diseño}}$) y flujo pico por unidad de área ($J_{\text{net, pico}}$)**

Inicialmente, ambos flujos deben elegirse con criterio técnico, con el objetivo que permitan la operación estable de la membrana a largo plazo. Como se expuso en la sección 2.4.5, un valor óptimo $J_{\text{net, diseño}}$ se encuentra en el rango de 15 a 35 LMH. Aplicando la recomendación de la empresa Evoqua, el flujo neto de diseño se asume en $22,6 \text{ l/m}^2 \cdot \text{h}$, mientras que el $J_{\text{net, pico}}$ se asume en $27,8 \text{ l/m}^2\text{h}$.

- **Área de membrana (A_m)**

El área de membrana requerida para el sistema se calcula a partir del caudal pico de $298.080 \text{ m}^3/\text{d}$ (para la etapa intermedia) y el $J_{\text{net, pico}}$ asumido, utilizando la siguiente ecuación:

$$A_m = \frac{Q_{pico}}{J_{net,pico}} \quad [Ec. 48]$$

$$A_m = 446.762 \, m^2$$

Conociendo el área de membrana requerida para todo el sistema (A_m), se selecciona la cantidad de trenes, módulos y membranas. El Cuadro 43 resume la información del sistema de membranas seleccionado para satisfacer las necesidades de “ A_m ”.

Cuadro 43. Información del sistema de membranas y áreas nominales para la etapa intermedia

Información del sistema de membranas	Valor	Unidad
Número de tanques de membranas (trenes)	12	tanques
Cantidad de racks por tanque	62	racks
Cantidad de módulos por rack	16	módulos
Número de módulos de membranas por tanque	992	módulos
Área nominal de membrana por módulo (*)	37,6	m ²
Área nominal de membrana por tanque	37.299	m ²
Área nominal de membrana total (12 tanques)	447.590	m²
(*) Información específica del modelo de membrana		

Fuente: Evoqua, 2016a.

Finalmente, se tendrá un área total de membrana de 447.590 m², satisfaciendo la necesidad de área calculada anteriormente de 446.762 m².

- **Tanques de membranas**

Las dimensiones de los tanques de membranas se seleccionaron según la geometría y cantidad de módulos y de racks propuestos. Dichas dimensiones se presentan en el Cuadro 44.

Cuadro 44. Dimensiones de cada tanque (tren) de membrana

Unidades dimensionales (por módulo)	Valor
Largo (m)	23,5
Ancho (m)	4,1
Profundidad del tanque (m)	3,2
Profundidad del agua (m)	2,5
Área del tanque (m ²)	96,35

- **Volumen mínimo de un tanque de membrana ($V_{m,min}$)**

El volumen mínimo requerido para cada tanque de membrana, se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_{m,min} = \frac{A_m (1 \text{ tanque})}{\phi_{tanque}} \quad [\text{Ec. 49}]$$

Donde:

$A_m (1 \text{ tanque})$ = Área nominal de un sólo tanque: 37.299 m² (Cuadro 43).

ϕ_{tanque} = Densidad de empaquetamiento de membrana en el tanque. Este parámetro es particular de cada tipo de membrana y casa comercial. Para la membrana seleccionada, este valor es de 580 m²/m³ (Judd, 2011), el cual indica que 580 m² de superficie de membrana requieren 1 m³ de volumen dentro del módulo.

Con la información anterior se obtiene un volumen mínimo de tanque de $V_{m,min} = 64,3 \text{ m}^3$.

El volumen mínimo del tanque se satisface con las dimensiones propuestas.

5.4.4.2. Sistema de aireación de los tanques de membranas

La aireación de los tanques de membranas es muy importante, pues debe cumplir la función tanto de aireación biológica, como de aireación para reducir el ensuciamiento de las membranas.

- **Tasa de aireación de membrana ($Q_{A,m}$)**

La tasa de aireación de la membrana se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{A,m} = SAD_m * A_m \quad [\text{Ec. 50}]$$

Donde:

SAD_m = Demanda de aire específica con respecto al área de membrana. Este valor es estimado según el tipo de membrana y debe encontrarse en un rango de 0,3 a 1,5 (Hai et al. 2014). Sin embargo, para el caso estudiado, para ser conservador, se asumirá un $SAD_m = 0,30 \text{ N m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{h}$.

$A_m = 447.590 \text{ m}^2$ del sistema propuesto (Cuadro 43).

Resolviendo la ecuación con los datos anteriores, $Q_{A,m} = 134.277 \text{ N m}^3/\text{h}$ (para todo el sistema de membranas).

- **Demanda de aire específica con respecto al área de membrana (SAD_p)**

La demanda de aire específica para la membrana se calcula de la siguiente manera:

$$SAD_P = \frac{SAD_m}{J_{net,diseño}} \quad [\text{Ec. 51}]$$

$$SAD_P = 13,3 \text{ Nm}^3 / \text{m}^2 \cdot h$$

- **Transferencia de oxígeno por la aireación de membrana (M_M)**

La aireación de las membranas requiere una cantidad específica de oxígeno, aportada mediante difusores de burbuja gruesa. Dicha aireación se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$M_M = Q_{A,m} \cdot \rho_A \cdot (SOTE_{gruesa} \cdot y_{gruesa}) \cdot O_{A,m} \cdot \alpha_{gruesa} \cdot \beta_{gruesa} \cdot \Phi_{gruesa} \quad [\text{Ec. 52}]$$

Los parámetros para difusores de burbuja gruesa utilizados en la ecuación anterior son los indicados en el Cuadro 45.

Cuadro 45. Parámetros operativos para los difusores de burbuja fina y gruesa

Parámetro	Símbolo	Burbuja Fina	Burbuja gruesa	Unidad
Eficiencia en la transferencia estándar de oxígeno	SOTE _x	0,05	0,02	%/m
Densidad del aire	ρ _A	1,2	1,2	kg/m ³
Factor de corrección por aireación (exponente)	ω _x	0,084	0,084	-
Porcentaje de masa de oxígeno en el aire	O _{A,m}	23,2	23,2	%
Corrección por transferencia de masa por sólidos	α _x	0,51	0,43	-
Corrección por transferencia de masa por salinidad	β _x	0,95	0,95	-
Corrección por transferencia de masa por viscosidad	Φ _x	1,024	1,024	-
Profundidad de la aireación	y _x	5,5	4,2	m

Fuente: Adaptado de Judd 2011 y propuesta de Evoqua, 2016a.

Los factores de corrección α y Φ se obtuvieron mediante las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = e^{-\omega_X X} \quad [\text{Ec. 53}]$$

$$\Phi = 1,024^{(T-20)} : \text{para una temperatura de } T = 22^\circ \text{C}$$

El resultado al aplicar dichas correcciones es de M_M = 39.317 kgO₂/d.

- **Flujo neto de aire por requerimientos biológicos (Q_{A,b})**

La aireación biológica de las membranas requiere una cantidad específica de oxígeno, aportada mediante difusores de burbuja fina, mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{A,b} = \frac{[M_o - M_M]}{[\rho_A * (SOTE_{fina} * y_{fina}) * O_{A,m} * \alpha_{fina} * \beta_{fina} * \Phi_{fina}]} \quad [\text{Ec. 54}]$$

Donde “Mo” corresponde al requerimiento de oxígeno total, calculado con el caudal promedio diario de toda la PTAR, siendo $M_o = 82.239 \text{ kgO}_2/\text{d}$. Los parámetros operativos por los difusores de burbuja fina corresponden a los indicados en el Cuadro 45. Finalmente, el valor de aire para requerimientos biológicos corresponde a $Q_{A,b} = 14.491 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

- **Tasa de flujo permeado (Q_P)**

La tasa de flujo permeado a través de la membrana se obtiene con la siguiente ecuación:

$$Q_P = A_m * J_{net,diseño} \quad [\text{Ec. 55}]$$

$$Q_P = 10.115 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.4.5. Resumen del prediseño mediante la tecnología MBR

5.4.5.1. Parámetros principales de diseño

El Cuadro 46 presenta un resumen de los principales parámetros de diseño mediante la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos.

Cuadro 46. Resumen de parámetros de diseño para la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos

Nombre del parámetro	Símbolo	Valor
Tiempo de retención del sólido (d)	TRS	9
Sólidos suspendidos del licor de mezcla del sistema biológico (mg/l)	MLSS _{Bio}	5.500
Sólidos suspendidos del licor de mezcla del sistema de membranas (mg/l)	MLSS _{Mem}	7.700
Tiempo de retención hidráulico total (h)	TRH _{proc}	16,25
Tasa de retorno de lodos (% del Q_{prom})	RAS	2,5

Fuente: Evoqua, 2016a.

5.4.5.2. Cantidad de unidades y dimensionamiento con las recomendaciones de Evoqua

La empresa Evoqua (2016) recomienda en su prediseño biológico (con tratamiento de nutrientes) el tanque “aireado-anóxico”, en vez de utilizar los tanques anóxicos que se

establecen en la metodología de Judd (2011), proceso particularmente diseñado por la empresa.

Los tanques aireados-anóxicos son utilizados principalmente en sistemas donde se busca una efectiva remoción de nutrientes, con la característica principal de que opera “en serie” mediante diferentes zonas, cada una separada mediante un tanque confinado.

El proceso aeróbico-anóxico está compuesto inicialmente por una zona completamente anóxica ($OD = 0 \text{ mg/l}$), seguida de una zona con cantidad muy reducida de oxígeno ($OD \approx 0,2 \text{ mg/l}$). Posterior a los tanques aeróbicos-anóxicos, se ubican los tanques aeróbicos, pero con menor cantidad de oxígeno que la requerida ($OD \geq 1 \text{ mg/l}$), finalizando con un tanque que suministre la suficiente cantidad de oxígeno que satisfaga completamente la demanda requerida ($OD = 2 \text{ mg/l}$). La intención de este sistema es incentivar a los microorganismos (bacterias nitrificantes y desnitrificantes) en un ambiente de alta demanda de alimento, al inicio no aportando oxígeno disuelto y luego incrementándose gradualmente, para mayor eficiencia.

Las ventajas de este sistema son las siguientes:

- La remoción de nutrientes (nitrificación-desnitrificación) ocurre simultáneamente.
- Reducción en el consumo energético del 20% al 30% comparado con un proceso convencional.
- Al ser volúmenes confinados, las condiciones de cada zona (aeróbica o anóxica) podrán ser controladas con mayor precisión.
- Al ser un proceso en serie, elimina impactos de “corto circuito” (el flujo viajará siguiendo el recorrido establecido).
- El sistema tiene un funcionamiento más estable, y las tasas de remoción de nitrógeno son más altas.

Considerando lo anterior, para el prediseño de la tecnología MBR de la PTAR Los Tajos, se ha decidido atender a las recomendaciones de la empresa Evoqua, modificándose aspectos de diseño (principalmente del proceso biológico).

El Cuadro 47 resume las unidades de tratamiento con el dimensionamiento propuesto para los tanques del sistema biológico y de membranas, según las recomendaciones de diseño de Evoqua, con la incorporación de la tecnología de tanques aeróbicos-anóxicos.

Cuadro 47. Cantidad de unidades de tratamiento y dimensiones para la tecnología MBR

Descripción	Etapa intermedia	Etapa II
Tanques tratamiento biológico		
Cantidad de trenes - tratamiento biológico	4 trenes (4 tanques por tren)	6 trenes (4 tanques por tren)
Cantidad de tanques biológicos	16 (8 aireado-anóxicos y 8 aeróbicos)	24 (12 aireado-anóxicos y 12 aeróbicos)
Dimensiones de un tanque biológico	Largo: 36,6 m, Ancho: 27,4 m, Profundidad útil: 6,1 m	
Volumen total de tanques biológicos (m³)	97.877	146.816
Tanques de membranas		
Cantidad de tanques de membranas	12	18
Dimensiones de los tanques de membranas	Largo: 23,5 m, Ancho: 4,1 m, Profundidad útil: 2,5 m	
Volumen total tanques membranas (m³)	2.891	4.336

La Figura 36 muestra un esquema con el sistema (biológico y de membranas) de la tecnología MBR propuesto para la PTAR Los Tajos. En la Figura 37 se ejemplifica el caso específico de los tanques de membranas.

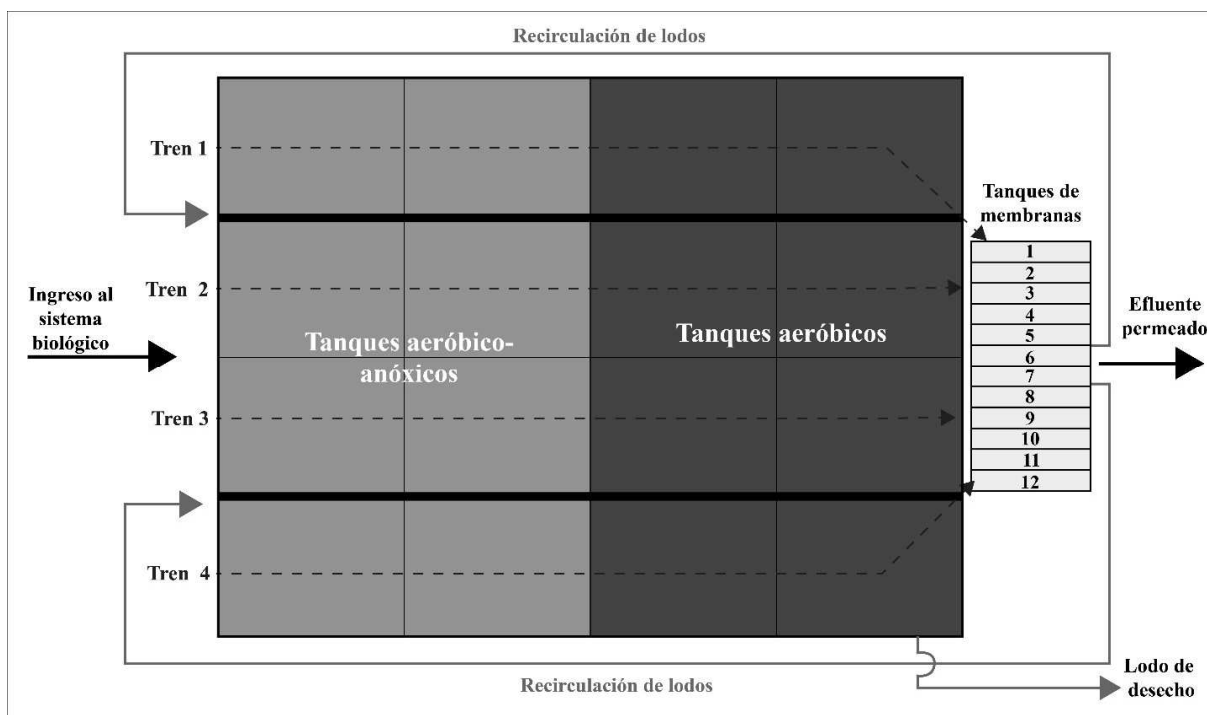


Figura 36. Esquema del prediseño mediante la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia)

Fuente: Adaptado de Evoqua, 2016a.



Figura 37. Esquema que ejemplifica la colocación del sistema de membranas para la PTAR Los Tajos
Fuente: Adaptado de Evoqua, 2016a.

Al apreciar tanto la Figura 36, como la Figura 37, se evidencia que la recirculación de lodos se realiza posterior a los tanques de membrana (no después de los tanques aeróbicos), ingresando a los tanques aeróbicos-anóxicos.

La Figura 38 muestra el emplazamiento en sitio de todas las unidades de tratamiento requeridas para la tecnología MBR, detallando por colores cada una de las etapas constructivas.

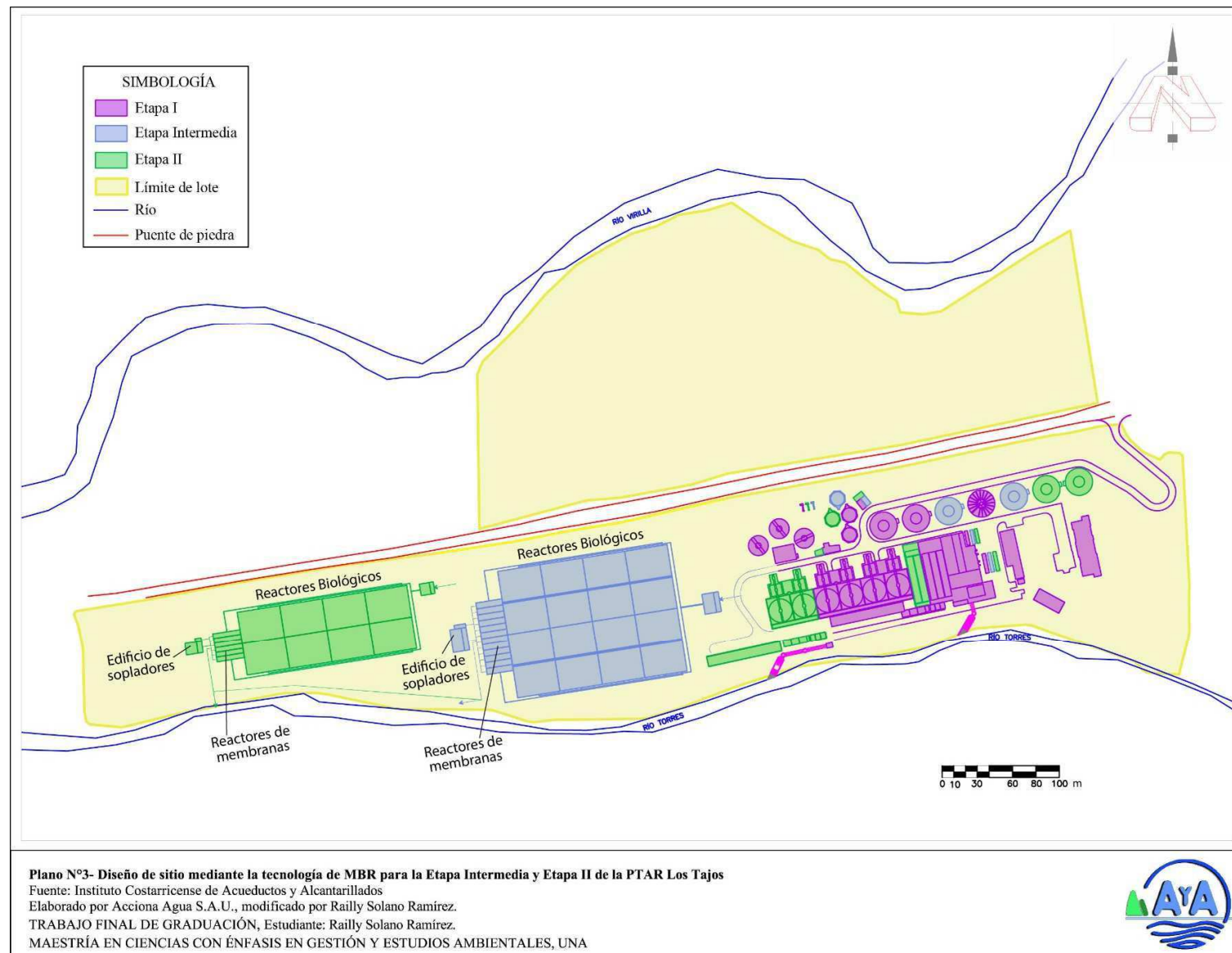


Figura 38. Diseño de sitio mediante la tecnología de MBR para la etapa intermedia y etapa II de la PTAR Los Tajos

Fuente: R. Solano 2016, Evoqua 2016, Acciona Agua S.A.U. 2010.

5.5. Área de terreno requerida para los prediseños del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos

Considerando los resultados de los prediseños realizados para las tres tecnologías, se determinó el área requerida en el terreno (huella constructiva), para lo cual, además de considerarse las dimensiones en planta de la infraestructura, se tomaron en cuenta aspectos como: la separación entre las edificaciones, conexiones físicas entre unidades, distancias o retiros, entre otros aspectos, lo que implicó mayor espacio por unidad de tratamiento, resultando finalmente mayor área efectiva de terreno. Esta área resultante se conoce como emplazamiento en sitio.

Se ubicaron las diferentes unidades de tratamiento para cada una de las tecnologías prediseñadas en los planos de los terrenos Los Tajos (norte y sur), con el objetivo de determinar el área del emplazamiento en sitio y considerar ésta como el área de terreno requerida por cada tecnología estudiada. Dichas áreas se presentaron anteriormente emplazadas en sitio, en el Plano N°1 para la tecnología LAC (Figura 27), el Plano N°2 para la tecnología IFAS (Figura 33), y el Plano N°3 para la tecnología MBR (Figura 38).

5.5.1. Área de terreno para el prediseño existente mediante la tecnología de LAC

Analizando el dimensionamiento mediante LAC, propuesto por Acciona Agua S.A.U., así como su propuesta de emplazamiento en sitio (Figura 27), el área total requerida (por emplazamiento) para el tratamiento secundario es aproximadamente de 45.598 m² para la etapa intermedia y 61.154 m² al final de la etapa II (Cuadro 48).

Cuadro 48. Áreas de terreno para la tecnología de LAC (etapa intermedia y etapa II)

Unidades de tratamiento secundario de la tecnología de LAC	Etapa intermedia		Etapa II		Etapas int.+ II
	Huella constructiva dimensionamiento (m ²)	Área efectiva emplazamiento en sitio (m ²)	Huella constructiva dimensionamiento (m ²)	Área efectiva emplazamiento en sitio (m ²)	Área efectiva total emplazamiento en sitio (m ²)
Reactores biológicos (LAC)	6.372	8.637	2.124	3.046	11.683
Edificio de sopladores	973	1.336	0	0	1.336
Sedimentadores secundarios	19.943	35.625	6.648	12.510	48.135
TOTAL	27.288	45.598	8.772	15.556	61.154

Fuente: Adaptado de Acciona Agua S.A.U., 2010.

Al analizar las diferencias entre la huella constructiva del dimensionamiento y las áreas efectivas del emplazamiento en sitio, se tienen porcentajes variables. Entre el edificio de sopladores y los reactores biológicos (de la etapa intermedia) existen diferencias intermedias (36% y 37% respectivamente),

mientras que para los sedimentadores secundarios se tiene una diferencia muy elevada (79%).

La etapa II no considera la construcción del edificio de sopladores, pues supone que habrá sido construido desde la etapa intermedia, previendo el aumento en la cantidad de equipo. En esta etapa, la diferencia entre el área de los reactores biológicos es también moderada (43%), mientras que para los sedimentadores secundarios es muy elevada (88%). Esta gran diferencia en el área de los sedimentadores secundarios, es debido a su geometría, pues al ser circulares, hay un menor aprovechamiento del espacio, aumentando el área de terreno requerida.

5.5.2. Área de terreno para el prediseño mediante la tecnología de IFAS

Similar al análisis realizado para la tecnología de LAC, se realizó el cálculo de las áreas para la tecnología de IFAS, tanto de huella constructiva del dimensionamiento, como del área efectiva del emplazamiento en sitio.

El área total requerida para el tratamiento secundario mediante la tecnología de IFAS es de 27.044 m² para la etapa intermedia y de 39.800 m² al finalizar la etapa II (Cuadro 49). Al igual que en la tecnología de LAC, los sedimentadores secundarios corresponden parte importante del área requerida para la tecnología de IFAS, lo que se observa en el Plano N°2 (Figura 33) presentado anteriormente con la propuesta del emplazamiento en sitio para esta tecnología.

Cuadro 49. Áreas de terreno para la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II)

Unidades de tratamiento secundario de la tecnología de LAC	Etapa intermedia		Etapa II		Etapas int. + II
	Huella constructiva dimensionamiento (m ²)	Área efectiva emplazamiento en sitio (m ²)	Huella constructiva dimensionamiento (m ²)	Área efectiva emplazamiento en sitio (m ²)	Área efectiva total emplazamiento en sitio (m ²)
Reactor biológico (IFAS + LAC)	2.304	2.625	1.024	1.225	3.850
Edificio de sopladores (LAC)	195	334	0	0	334
Sopladores externos (IFAS)	30	101	10	36	137
Sedimentadores secundarios	13.295	23.985	6.648	11.494	35.479
TOTAL	15.824	27.044	7.682	12.755	39.800

Fuente: Adaptado de Headworks Bio Inc. 2016 y Autora.

5.5.3. Área de terreno para el prediseño mediante la tecnología de MBR

El cálculo de área de terreno para la tecnología MBR, aplicó el mismo procedimiento de las tecnologías anteriores. El Cuadro 50 resume las áreas producto del dimensionamiento, así como las del emplazamiento en sitio (Figura 38).

Cuadro 50. Áreas de terreno para la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II)

Unidades de tratamiento secundario de la tecnología de MBR	Etapa intermedia		Etapa II		Etapas int. + II
	Huella constructiva dimensionamiento (m ²)	Área efectiva emplazamiento en sitio (m ²)	Huella constructiva dimensionamiento (m ²)	Área efectiva emplazamiento en sitio (m ²)	Área efectiva final emplazamiento en sitio (m ²)
Reactores biológicos (LAC)	16.046	17.617	8.023	9.266	26.883
Reactores de membranas	1.156	1.490	578	731	2.221
Edificio de sopladores	156	310	78	181	491
Infraestructura complementaria	397	632	200	316	948
TOTAL	17.755	20.049	8.879	10.494	30.543

Fuente: Adaptado de Evoqua, 2016a y 2016b.

Como se observa en el Cuadro 50, el área total requerida del tratamiento secundario mediante la tecnología de MBR es de 20.049 m² para la etapa intermedia, aumentando a 30.543 m² al final de la etapa II. En este caso, la infraestructura correspondiente a los reactores biológicos requiere mayor superficie que para las tecnologías de LAC e IFAS. Sin embargo, al no requerirse los sedimentadores secundarios, se optimiza el uso del terreno, siendo la tecnología con menores requerimientos de área.

La implementación de la tecnología de MBR no requiere el uso del terreno Tajo Norte para la instalación de infraestructura, tanto para la etapa intermedia como para la etapa II, aspecto que reduce los costos de terreno y de construcción, pues no requeriría del túnel de conexión entre los dos terrenos Los Tajos, lo que se observa en el Plano N°3 (Figura 38) presentado anteriormente con la propuesta del emplazamiento en sitio para esta tecnología.

5.5.4. Comparación de áreas de terreno de las tres tecnologías analizadas

El Cuadro 51 resume los resultados de las áreas totales de cada etapa analizada, según la tecnología de tratamiento LAC, IFAS y MBR. Se puede identificar claramente que el área efectiva mayor corresponde a la tecnología de LAC, seguida de la tecnología IFAS y finalmente la tecnología de MBR (aproximadamente la mitad del área de LAC).

Cuadro 51. Áreas totales de terreno para la PTAR Los Tajos, requeridas por cada tecnología

Tecnología	Área efectiva final del emplazamiento en sitio (ha)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapas intermedia + II
LAC	4,56	1,56	6,12
IFAS	2,70	1,28	3,98
MBR	2,00	1,05	3,05

Tanto para las tecnologías de LAC como de IFAS, al requerir las unidades de sedimentación secundaria, el área de emplazamiento es mayor en comparación con la tecnología MBR. Además, debido a la superficie circular de los sedimentadores secundarios, se requiere mayor disponibilidad de espacio en conjunto.

El área requerida para los sedimentadores secundarios del prediseño de la tecnología IFAS, es mucho menor que el área requerida en el prediseño de LAC, debido a las diferencias en los parámetros de diseño, tanto en lo que respecta al caudal de recirculación de lodos (100% del QPD para LAC y 50% para IFAS), como a la selección de las tasas de carga hidráulica y carga de sólidos (Cuadro 26); ambos factores afectan directamente el área requerida para sedimentación.

Específicamente para este proyecto, por la magnitud del caudal a tratar, la tecnología MBR requiere un área de grandes dimensiones para el tratamiento biológico (26.883 m²), acercándose al área total requerida para la tecnología IFAS (39.800 m²), aspecto que reduce su ventaja comparativa de tecnología compacta.

Como se expuso en el capítulo IV, el terreno Tajo Sur es propiedad del AyA y en total cuenta con 13,56 ha. La etapa I de la PTAR utilizó aproximadamente 3,76 ha del terreno, dejando disponible cerca de 6,2 ha (considerando retiros, distancias entre edificaciones, etc.). Sin embargo, por la topografía y geometría del terreno, no es posible utilizarlo por completo.

Debido a las proyecciones realizadas durante la concepción del proyecto, el AyA previó la compra del terreno Tajo Norte (aproximadamente 8,9 ha), siendo también importante para contar con mayor área de terreno en caso que se quisiera ampliar a futuro la PTAR (posterior a la etapa II). A la fecha (agosto 2017) dicho terreno está en proceso de adquisición por parte del AyA.

5.6. Calidad esperada del efluente para cada tecnología prediseñada

Los prediseños de las tres tecnologías analizadas cuentan con diferencias en las calidades esperadas del agua tratada (efluente), las cuales se detallan y comparan en esta sección.

5.6.1. Calidad esperada del efluente de la tecnología LAC

El prediseño de la tecnología LAC presentado por Acciona Agua S.A.U., fue realizado para cumplir con los lineamientos de calidad del efluente solicitados en el cartel de la licitación L.P.I. N°2008-

0002-PRI del AyA, los cuales se detallaron en el Cuadro 20 (del capítulo III). El Cuadro 52 indica los valores y rangos de calidad del efluente indicados por Acciona Agua en su Plan Maestro, los cuales cumplen con lo solicitado en el cartel de licitación.

Cuadro 52. Calidad esperada del efluente mediante la tecnología de LAC (etapa intermedia y etapa II)

Parámetro	Calidad del efluente
DBO ₅ (mg/l)	30
SST (mg/l)	30
pH	5 a 9
Temperatura (°C)	15 a 40
Grasas/aceites (mg/l)	30
Sólidos sedimentables (ml/l)	1

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

5.6.2. Calidad esperada del efluente de la tecnología IFAS

El prediseño mediante la tecnología IFAS, similar a la tecnología LAC, busca cumplir con los mismos límites de vertido solicitados en la L.P.I. N°2008-0002-PRI del AyA. La empresa Headworks Bio Inc. ha indicado una aproximación de la calidad del efluente después de cada biorreactor (según la configuración de biorreactores IFAS y los posteriores biorreactores LAC), así como la calidad del efluente al final del tratamiento secundario (incluyendo los sedimentadores secundarios), valores que se detallan en el Cuadro 53.

Cuadro 53. Calidad esperada del efluente posterior a cada etapa de tratamiento secundario, mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II)

Parámetro	Después del biorreactor IFAS	Después del biorreactor LAC	Calidad del efluente
DBO ₅ (mg/l)	< 65*	< 15*	< 15
DQO (mg/l)	< 175*	< 125*	< 125
SST (mg/l)	290	330	< 30
Grasas y Aceites (mg/l)	< 20	< 20	< 20
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9
*: DBO y DQO son basados en su estado soluble			

Fuente: HeadworksBio Inc., 2016.

Como se muestra en el Cuadro 53, al finalizar el tratamiento secundario mediante IFAS, todos los parámetros cumplirán con la calidad del efluente solicitada en la L.P.I. Cabe indicar que el parámetro de SST será removido durante la fase de sedimentación secundaria, pues el objetivo exclusivo de la etapa de biorreactores es la remoción de contaminantes orgánicos.

5.6.3. Calidad esperada del efluente de la tecnología MBR

El prediseño presentado por la empresa Evoqua, indica los valores aproximados de calidad del efluente final, resultante de la tecnología MBR en la PTAR Los Tajos. El Cuadro 54 detalla esta información, donde se muestra que todos los parámetros sobrepasarían por mucho los límites de vertido solicitados en la L.P.I. N°2008-0002-PRI del AyA, pues como se indicó en la sección 2.4.6, mediante esta tecnología es posible lograr remociones de contaminantes mucho mayores que con tecnologías convencionales (Yang, 2013).

Cuadro 54. Calidad resultante del efluente mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II)

Parámetro	Calidad del efluente
DBO ₅ (mg/l)	< 5
DQO (mg/l)	< 50
SST (mg/l)	≤ 5
Turbiedad (NTU)	≤ 0,2
Amoníaco NH ₃ (mg/l)	< 1

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

5.6.4. Comparación de la calidad del efluente esperada

El Cuadro 55 resume los valores esperados al final del tratamiento secundario, para los principales parámetros de calidad del efluente, según los prediseños propuestos para las tres tecnologías analizadas (LAC, IFAS, MBR).

Cuadro 55. Comparación de la calidad esperada del efluente de las tres tecnologías analizadas

Parámetro	Calidad del efluente final por tecnología		
	LAC	IFAS	MBR
DBO ₅ (mg/l)	30	< 15	< 5
SST (mg/l)	30	< 30	≤ 5
DQO (mg/l)	150	< 125	< 50
pH	5 – 9	6 – 9	-
Grasas y aceites (mg/l)	30	< 20	-
Turbiedad (NTU)	-	-	≤ 0,2
Amoníaco NH ₃ (mg/l)	-	-	< 1

Fuente: Acciona Agua S.A.U. 2010, Headworks Bio Inc. 2016, Evoqua 2016a y 2016b.

Como se observa en el Cuadro 55, la calidad del efluente esperada de la tecnología LAC cumple al límite lo solicitado en la L.P.I. N°2008-0002-PRI del AyA. La eficiencia de remoción de DBO, DQO y de grasas y aceites de la tecnología IFAS, es mayor que la tecnología LAC, debido a que la tecnología IFAS tiene una mayor capacidad de remoción de cargas orgánicas. El efluente resultante de la

tecnología MBR supera mucho la calidad del efluente de las otras dos tecnologías, debido a las características de ultrafiltración de las membranas, que permiten una alta eficiencia en la remoción de contaminantes.

5.7. Consumo energético para cada tecnología prediseñada

Se seleccionaron los principales equipos electromecánicos de las tres tecnologías, necesarios para el tratamiento secundario de las aguas residuales. A continuación, se detallan los consumos energéticos para cada tecnología, así como una comparación entre los tres resultados.

5.7.1. Consumo energético para la tecnología LAC

Acciona Agua S.A.U. en su Plan Maestro propone el equipo correspondiente al tratamiento secundario para cada etapa (cantidad de máquinas, potencia instalada, horas de funcionamiento por día, etc.). La estimación del consumo energético de la tecnología LAC, únicamente consideró la demanda de los equipos más importantes del tratamiento secundario: sopladores, rasquetas barrelos (de los sedimentadores secundarios), bombas de recirculación de lodos y bombas de purga de lodos. El Cuadro 56 resume esta información para ambas etapas.

Cuadro 56. Consumo energético del equipo para tratamiento secundario mediante LAC propuesto por Acciona Agua S.A.U. (etapa intermedia y etapa II)

Etapas del proyecto	Equipo principal del tratamiento secundario	Equipo operando	Equipo en reserva	Potencia motor instalada (kW)	Tiempo operando por día (h)	Total potencia consumida (kW)
Etapa intermedia	Sopladores	4	3	355	23,9	1.420
	Bombas recirculación lodos	6	3	125	23,8	750
	Bombas purga de lodos	3	3	6,4	17,4	19,2
	Rasquetas barrelos	12	-	20	24	240
	Potencia instalada total (etapa intermedia)					2.429
Etapa II	Sopladores	8	1	355	17,1	2.840
	Bombas recirculación lodos	10	5	125	22,3	1.250
	Bombas purga de lodos	5	5	6,4	17,5	32
	Rasquetas barrelos	16	-	20	24	320
	Potencia instalada total (etapa II)					4.442
Nota: Los equipos operarán los 365 días del año.						

Fuente: Acciona Agua, 2010.

Conociendo la potencia consumida (expresada en unidades kW) de los diferentes equipos del tratamiento secundario y las horas diarias de operación durante un año, se obtiene el consumo total anual (en unidades de kWh/año), información que se presenta en el Cuadro 57.

Cuadro 57. Consumo energético anual para el tratamiento secundario mediante LAC propuesto por Acciona Agua S.A.U. (etapa intermedia y etapa II)

Equipo	Etapa intermedia		Etapa intermedia + etapa II	
	Consumo total anual (kWh/año)	Porcentaje del consumo	Consumo total anual (kWh/año)	Porcentaje del consumo
Sopladores	12.387.370	58,6%	17.725.860	57,3%
Bombas recirculación lodos	6.515.250	30,8%	10.174.375	32,9%
Bombas purga de lodos	121.939	0,6%	204.400	0,7%
Rasquetas barrelodos	2.102.400	10%	2.803.200	9,1%
TOTAL	21.126.959	100%	30.907.835	100%

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010; ICE, 2017.

Como se observa en el Cuadro 57, la aireación de los tanques de lodos activados (mediante los sopladores), constituye el proceso de mayor consumo energético de la propuesta de LAC, siendo del total del consumo del tratamiento secundario 58,6% para la etapa intermedia y de 57,4% para la etapa II. Este porcentaje podría bajar, al incorporar el consumo de todos los equipos electromecánicos instalados en toda la PTAR. Tchobanoglous et al. (2004) indica que la aireación corresponde al 55,6% del consumo energético de la totalidad de un sistema de tratamiento completo de LAC, porcentaje cercano al calculado anteriormente.

La energía consumida por aireación en un sistema de tratamiento mediante LAC, puede variar entre 18 y 26 kWh/hab·año (Sperling, 2007a). Considerando la población que será cubierta por el sistema de alcantarillado sanitario del PMAAMSJ, el consumo por aireación es menor que los valores del rango indicado por Sperling, siendo 12 kWh/hab·año (etapa intermedia) y 11 kWh/hab·año (etapa II), lo que puede deberse principalmente al conjunto de componentes adicionales de las PTARs (filtros del efluente, post-aireación, cloración, etc.) consideradas por Sperling.

5.7.2. Consumo energético de la tecnología IFAS

5.7.2.1. Caso de la PTAR El Roble

La PTAR El Roble (Puntarenas) modificó la tecnología de tratamiento a finales del 2014, pasando de LAC a IFAS. Se analizaron los datos de consumo energético (antes y después de la modificación), los cuales se presentan en el Cuadro 58.

Cuadro 58. Consumo energético antes y después de la implementación de la tecnología IFAS en la PTAR El Roble.

Tecnología operando	Caudal de entrada (m³)	Energía (kWh)	Demanda (kW)	Consumo/ caudal entrada (kWh/m³)
LAC⁽¹⁾	142.524	66.912	186,9	0,47
IFAS⁽²⁾	209.554	138.448	352,6	0,66
Diferencia	67.030	71.536	165,7	0,19
Notas: (1) Datos promedio mensuales entre el 01 noviembre 2013 al 31 de Julio 2014. (2) Datos promedio mensuales entre el 01 noviembre 2014 al 31 de Julio 2015.				

Fuente: AyA, 2015.

Los datos mostrados en el Cuadro 58, indican que el caudal de entrada en la PTAR El Roble durante el 2013 y el 2015, aumentó cerca de un 47%, dato que podría estar sobrestimado, pues previo a la implementación de la tecnología IFAS, el caudal era medido de manera manual en la PTAR. Como parte del proyecto de modificación de la tecnología en la PTAR, se colocó una nueva canaleta Parshall y un medidor de caudal ultrasónico a la entrada, pues no se contaba con un instrumento preciso para esta medición. Así mismo, cabe indicar que la PTAR no ha estado recibiendo nuevos servicios, por lo que podría decirse que el caudal no debería estar variando significativamente de un año al otro.

Al analizar los datos de consumo de energía (kWh) después de la implementación de la tecnología IFAS, éstos aumentaron cerca del 107%. Considerando el aumento de caudal (47%), podría decirse que en general, el consumo de energía aumentó cerca de un 60% al cambiar de tecnología. Al relacionar el consumo con el caudal de entrada (m³) resulta un aumento menor (41%), valor que se ve afectado por la imprecisión en la medición del caudal previo a la instalación de la canaleta Parshall y el medidor ultrasónico. Por lo anterior, se puede indicar que el consumo energético al pasar de tecnología LAC a IFAS en la PTAR El Roble, aumentó entre el 40% y 60%.

5.7.2.2. Caso de la PTAR Los Tajos

El consumo energético de la tecnología IFAS se analizó de manera similar a la tecnología de LAC, únicamente se consideraron los consumos de los equipos del tratamiento secundario (sopladores, rasquetas barrelos (de los sedimentadores secundarios), bombas de recirculación de lodos y bomba de purga de lodos), los cuales fueron seleccionados por criterio técnico y la colaboración de expertos de las empresas proveedoras. El Anexo C resume algunas recomendaciones para la selección del equipo mecánico aportadas por expertos en el tema.

Como parte de esta selección, en el Cuadro 59 se incluye la potencia a instalar y las horas diarias de operación de cada equipo, con lo que es posible estimar el consumo energético.

Cuadro 59. Consumo energético del equipo para el tratamiento secundario mediante la tecnología IFAS de la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Etapa del proyecto	Equipo principal del tratamiento secundario	Equipo operando	Equipo en reserva	Potencia motor instalada (kW)	Tiempo operando por día (h)	Total potencia consumida (kW)
Etapa Intermedia	Sopladores IFAS	3	-	184,7	24,0	554
		1	-	184,7	18,0	185
	Sopladores LAC	2	-	1.416,8	21,6	2.834
	Bombas recirculación lodos	2	2	125,0	24,0	250
	Bombas purga de lodos	2	2	11,0	17,0	22
	Rasquetas barrelodos	8	-	0,6	24,0	4
	Potencia instalada total (etapa intermedia)					3.849
Etapa II	Sopladores IFAS	5	-	184,7	24,0	924
		1	-	184,7	18,0	185
	Sopladores LAC	3	-	1.416,8	21,6	4.251
	Bombas recirculación lodos	3	3	125,0	24,0	375
	Bombas purga de lodos	3	3	11,0	17,0	33
	Rasquetas barrelodos	12	-	0,6	24,0	7
	Potencia instalada total (etapa II)					5.775
Nota: Los equipos operarán los 365 días del año.						

Fuente: Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015.

Los resultados de consumo total de energía anual en unidades de GWh/año, se muestran en el Cuadro 60, tanto para la etapa intermedia, como para la incorporación de la etapa II.

Cuadro 60. Consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II)

Equipo	Etapa intermedia		Etapa intermedia + etapa II	
	Consumo total anual (GWh/año)	Porcentaje del consumo	Consumo total anual (GWh/año)	Porcentaje del consumo
Sopladores	28,41	92,3%	42,81	92,3%
Bombas recirculación lodos	2,19	7,1%	3,29	7,1%
Bombas purga de lodos	0,14	0,4%	0,20	0,4%
Rasquetas barrelodos	0,04	0,1%	0,06	0,1%
TOTAL	30,77	100%	46,36	100%

Fuente: Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015; ICE, 2017.

Al igual que en la tecnología de LAC, en la tecnología de IFAS el componente por aireación es el que consume mayor energía (Cuadro 60). Sin embargo, en este caso la energía total por aireación es más del 90% de toda la energía requerida para el tratamiento secundario mediante IFAS. Este aumento en el consumo energético se debe a los mayores requerimientos de aire en el Biorreactor IFAS (que contiene los biosoportes), donde se precisa abundante cantidad de oxígeno, tanto para las actividades metabólicas de los microorganismos como para tener mayor rigurosidad en la agitación de las celdas en el licor de mezcla.

5.7.3. Consumo energético de la tecnología MBR

Los elementos que consumen más energía en un sistema MBR, son los que componen el sistema de las membranas, principalmente debido a la aireación que requieren para su limpieza (“*air scour*”). También, se consume energía en el proceso de bombeo para filtración, recirculación interna y purga de lodos; así como la aireación para cumplir con los requerimientos de oxígeno para el proceso biológico.

La empresa Evoqua aportó información del prediseño, donde se especifican las potencias requeridas para los equipos electromecánicos y las horas de funcionamiento por día (Evoqua, 2016c), con lo que es posible estimar el consumo energético de implementar la tecnología de MBR, información que se resume en el Cuadro 61.

Cuadro 61. Consumo energético del equipo para el tratamiento secundario mediante la tecnología MBR de la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Etapa del proyecto	Equipo principal del tratamiento secundario	Equipo operando	Equipo en reserva	Potencia motor instalada (kW)	Tiempo operando por día (h)	Total potencia consumida (kW)
Etapa intermedia	Soplador del sistema biológico	6	6	422,4	24,00	2.534
	Bomba para filtrado MOS	12	-	18,5	21,95	222
	Bomba alimentación tanques MOS	12	-	59,4	23,90	713
	Sopladores para el MOS	12	-	75,7	23,90	908
	Compresores de aire auxiliares	1	1	2,8 CFM/HP	15,94	21
	Potencia instalada total (etapa intermedia)					4.398
Etapa II	Soplador del sistema biológico	9	9	422,4	24,00	3.802
	Bomba para filtrado MOS	18	-	18,5	21,95	333
	Bomba alimentación tanques MOS	18	-	59,4	23,90	1.069
	Sopladores para el MOS	18	-	75,7	23,90	1.363
	Compresores de aire auxiliares	2	2	2,8 CFM/HP	15,94	41
	Potencia instalada total (etapa II)					6.608
Notas:						
- MOS: Sistema de Operación de las Membranas (por las siglas en inglés de <i>Membrane Operating System</i>)						
- Los equipos operarán los 365 días del año.						

Fuente: Evoqua; 2016a, 2016b y 2016c.

Los datos de potencia consumida, las horas y los días al año de operación, permiten obtener el consumo de energía anual en unidades de GWh/año, información que se resume en el Cuadro 62.

Cuadro 62. Consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II)

Equipo	Etapa intermedia		Etapa intermedia + etapa II	
	Consumo total anual (GWh/año)	Porcentaje del consumo	Consumo total anual (GWh/año)	Porcentaje del consumo
Soplador del sistema biológico	22,20	58,1%	33,30	58,0%
Bomba para filtrado MOS	1,78	4,7%	2,67	4,6%
Bomba alimentación de tanques MOS	6,22	16,3%	9,33	16,2%
Sopladores para el MOS	7,92	20,7%	11,89	20,7%
Compresores de aire auxiliares	0,12	0,3%	0,24	0,4%
TOTAL	38,24	100,0%	57,42	100,0%

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

La socavación de aire en los sistemas MBR es el componente de mayor consumo energético. Brepols (2011) indica en su estudio que el “air scour” corresponde al 49,2% del consumo total de un sistema MBR en Nordkanal, Alemania. Sin embargo, los sopladores del Sistema de Operación de Membranas (MOS) propuestos para la PTAR Los Tajos, corresponden alrededor del 20% del consumo energético de todo el sistema.

El “Mempulse™” es un sistema eficiente de sopladores para el “air scour”, patentizado por la empresa Evoqua, los cuales se encuentran integrados al módulo de las membranas aportando aire sobre las mismas, distribuyéndolo uniformemente y ahorrando energía (Evoqua, 2015). La reducción en el porcentaje de consumo energético para los sopladores del MOS, se debe al sistema “Mempulse™”.

La propuesta de Evoqua específica para la PTAR Los Tajos, incluye una fase biológica (previa a las membranas) de importante magnitud. Las considerables dimensiones de la etapa biológica conllevan a que los sopladores del sistema biológico sean los que mayor energía consumen de todo el tratamiento secundario (58% del consumo), esto a pesar de contar con tanques aeróbicos-anóxicos donde se ahorra energía por los ciclos sin aireación.

5.7.4. Comparación del consumo energético de las tres tecnologías analizadas

Debido a que el componente de aireación es el que consume mayor energía en las tres tecnologías analizadas, en el Cuadro 63 se resume la información de consumo energético específica para aireación en cada tecnología.

Cuadro 63. Consumos energéticos anuales por aireación para cada tecnología de tratamiento secundario analizada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Consumo total por aireación (GWh/año)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
LAC (sopladores LAC)	12,39	5,34	17,73
IFAS (sopladores LAC + IFAS)	28,41	14,41	42,81
MBR (sopladores sistema biológico + MOS)	30,13	15,06	45,19

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

La tecnología de IFAS, a pesar de compartir muchas similitudes con la tecnología de LAC, presenta una gran diferencia en el tema de consumo energético, pues para este caso en específico, la tecnología IFAS consume 130% más energía por aireación que la tecnología LAC (Cuadro 63). Únicamente por aireación, la tecnología IFAS consume más energía (42,81 GWh/año), que todo el tratamiento secundario mediante LAC (30,91 GWh/año).

La propuesta de Evoqua mediante la tecnología MBR, incluyó sopladore eficientes para el “air scour” de las membranas (sistema Mempulse™) y propuso un tratamiento biológico que combina el sistema aeróbico con el aeróbico-anóxico que ahorra energía por la ausencia de aireación en las zonas anóxicas. Los sopladore del sistema biológico consumen mucha energía, siendo la tecnología que requiere mayor consumo energético de las tres tecnologías analizadas. Comparándola con la tecnología LAC, sólo por aireación ésta consume más de 143%, y con respecto a la tecnología IFAS se separan de escasos 8% más, porcentajes que también evidencian la abundante necesidad de energía para aireación en la tecnología IFAS.

El Cuadro 64 resume los resultados del consumo energético total (considerando todos sus componentes) para las tres tecnologías estudiadas.

Cuadro 64. Consumos energéticos anuales por cada tecnología de tratamiento secundario estudiada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Consumo total anual (GWh/año)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
LAC	21,13	9,78	30,91
IFAS	30,77	15,59	46,36
MBR	38,24	19,18	57,42

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

La estimación del consumo energético por unidad de volumen (m³ de agua tratada), se realizó dividiendo los consumos energéticos -exclusivos del tratamiento secundario- en (kWh/d) entre el

caudal promedio diario QPD (m^3/d) de cada etapa de la PTAR. Los resultados se observan en el Cuadro 65.

Cuadro 65. Consumo energético por volumen de agua tratada, para cada tecnología de tratamiento secundario analizada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Consumo energético por QPD (kWh/m^3 agua a tratar)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
LAC	0,24	0,21	0,23
IFAS	0,35	0,34	0,35
MBR	0,43	0,42	0,43

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

No se determinaron datos de consumo energético exclusivo para las fases de tratamiento secundario en la literatura consultada, únicamente para PTARs completas. Tampoco se encontraron datos específicos de consumo energético para la tecnología IFAS. Tchobanoglous et al. (2004) indica que para la tecnología de LAC el consumo total del sistema se encuentra entre de $0,32 \text{ kWh}/\text{m}^3$ y $0,66 \text{ kWh}/\text{m}^3$, mientras que para la tecnología MBR (en una configuración interna) se presentan valores de consumo entre $0,7 \text{ kWh}/\text{m}^3$ y $1,2 \text{ kWh}/\text{m}^3$ (Iglesias, 2014).

Al comparar los consumos energéticos de las tecnologías LAC y MBR (Cuadro 65) con los valores indicados en las referencias, a pesar de que estos rangos de valores incluyen todos los procesos de tratamiento de una PTAR, se podría afirmar que el consumo del tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos, estaría dentro de los rangos comunes para otras PTARs de similar tecnología, pues el tratamiento secundario es de los procesos que más consumen energía en una PTAR.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS **FINANCIERO**

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS FINANCIERO

6.1. Costos asociados a la adquisición de terreno para las tecnologías LAC, IFAS Y MBR

Las áreas de terreno requeridas para cada tecnología, fueron calculadas en la sección 5.5. Esta información se utilizó para estimar el costo de la adquisición de terreno.

El “*Mapa de valores de terrenos por zonas homogéneas del cantón de San José*” (2014), del Órgano de Normalización Técnica del Ministerio de Hacienda, el cual es utilizado por la plataforma de valores de la Municipalidad de San José para cobrar el impuesto predial; establece las distintas zonas homogéneas del cantón, con los montos por metro cuadrado según la zona homogénea.

Ambos terrenos de Los Tajos (Norte y Sur) se encuentran dentro de la “Zona Homogénea Urbana 101-07-U19 (Parque de Diversiones)”, con actividad comercial de baja intensidad (C01), en la cual se establece un valor de ₡40.000/m², el cual corresponde al valor fiscal del 2014. Debido a la ubicación y a las características urbano-sociales del sitio, el costo por metro cuadrado de esta zona es bajo con respecto a otras zonas del cantón central de San José, aspecto que se traduce en reducción de costos por adquisición de terreno.

El valor del terreno de esta zona homogénea urbana, actualizado a enero del 2017 con el Índice de Precios al Consumidor (IPC) del Banco Central de Costa Rica (BCCR, 2017a), aumenta a ₡42,000/m². Este valor podría tener variaciones dependiendo del valor de venta en la zona y de las características particulares del lote. Sin embargo, para los objetivos de este TFG, se utilizará este monto por unidad de área, con el cual se obtienen los costos por adquisición de terreno para cada tecnología prediseñada.

El Cuadro 66 muestra los costos en dólares estadounidenses correspondientes a la adquisición del terreno de las tres tecnologías, para cada etapa de análisis y para el proyecto completo. El tipo de cambio utilizado corresponde al promedio del tipo de cambio de venta del primer semestre del 2017 (del 01 de enero del 2017 al 01 julio del 2017), según los datos del Banco Central (BCCR, 2017c).

Cuadro 66. Costos de la adquisición de terreno para la PTAR Los Tajos, por cada tecnología y etapa

Tecnología	Costo de adquisición del terreno (miles de US\$)		
	Etapas intermedia	Etapas II	Etapas intermedia + etapas II
LAC	3.359,3	1.146,1	4.505,4
IFAS	1.992,4	939,7	2.932,2
MBR	1.477,1	773,1	2.250,2
Nota: Tipo de cambio del dólar es de ₡570,09/\$.			

El mayor costo de terreno corresponde a la tecnología de LAC, por ser la que requiere mayor área de terreno, seguido de IFAS y finalmente MBR.

6.2. Costos de inversión para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante las tecnologías LAC, IFAS y MBR

6.2.1. Aspectos importantes a considerar para la estimación de costos de inversión

6.2.1.1. Rubros de los costos de inversión

La estimación del costo de inversión inicial de todas las tecnologías analizadas, utilizó como base los rangos de “fracción del costo” según los clasifica Haandel y Lubbe (2012) en el Handbook of Biological Wastewater Treatment. Dicho costo fue desglosado en los diferentes rubros: preparación del terreno, construcción (obra civil, equipamiento mecánico, eléctrico e instrumentación, tuberías y accesorios, control y automatización, imprevistos), puesta en marcha y costos adicionales (utilidad, diseño, administración); información que se muestra en el Cuadro 67.

Cuadro 67. Desglose típico de rubros del costo de inversión total (se excluye el costo por la adquisición del terreno)

Rubro	Fracción del costo	Descripción del rubro
1. Preparación		
1.1.Preparación del terreno	0,5 a 2%	Trabajos de suelo/roca, nivelaciones.
1.2.Preparación de infraestructura	-	Caminos de accesos, líneas para tuberías y suministro de energía.
2. Construcción	70 a 85%	
2.1.Civil	23 a 29%	Construcción de las unidades de tratamiento, edificaciones y cimentaciones.
2.2.Mecánica	21 a 27%	Costo del equipo, incluyendo instalación y tuberías locales.
2.3.Eléctrico e Instrumentación	10 a 16%	Instrumentación local y equipo electrónico.
2.4.Tuberías de interconexión	2 a 5%	Tuberías y accesorios de interconexión, aislamiento.
2.5. Centro de control del proceso	2 a 5%	Centro de control del proceso, incluyendo software gabinetes, convertidores, cables, subestación.
2.6.Contingencia	10 a 20%	Gastos por imprevistos.
3. Puesta en marcha	1 a 3%	Pruebas de equipo, de laboratorio, suplementos para el arranque (químicos, cables, etc.), capacitación del personal.
4. Adicionales	10 a 20%	Estudios iniciales, proceso de licitación, planificación y presupuesto, supervisión, administración del proyecto.
TOTAL	100%	

Fuente: Adaptado de Haandel y Lubbe, 2012.

Los rangos de porcentajes indicados por Haandel y Lubbe (2012) son valores típicos de PTARs municipales con la tecnología de LAC, existentes en Europa y EE.UU., donde se reflejan los costos de inversión de una PTAR completa, en todas sus etapas de tratamiento (línea de aguas residuales y de lodos). Este TFG analizó únicamente el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos, por lo que

algunos de los porcentajes fueron levemente modificados a los de la referencia. Además, dependiendo de las características de las tecnologías analizadas y las necesidades particulares de este proyecto (por ejemplo, movimientos de tierra, nivelaciones, construcción del túnel, etc.) los porcentajes variaron con respecto al rango indicado en el Cuadro 67.

6.2.1.2. Costos asociados con la construcción de las obras complementarias

Tanto para implementar la tecnología de LAC como de IFAS, por las necesidades de área de terreno detalladas en la sección 5.5, se requerirá el uso de los dos terrenos (Tajo Sur y Norte), siendo indispensable construir una obra complementaria que comunique ambos terrenos, tanto para dar acceso al personal de la PTAR, como para conectar las diferentes unidades de tratamiento entre sí.

Acciona Agua S.A.U. en el prediseño mediante LAC, propone la construcción de un túnel abovedado que cruce el Puente de Piedra, con posibilidad para el acceso de un camión, así como de las diferentes tuberías que se interconectan de la PTAR (lodos que van del tanque de aireación hacia los sedimentadores secundarios, recirculación de lodos, purga de lodos, etc.).

Como parte de esta investigación, se realizaron consultas a expertos en el tema de túneles, quienes aportaron recomendaciones de diseño y del método de construcción del túnel, a partir de las características de la roca del Puente de Piedra, y las dimensiones aproximadas del túnel (Anexo D), se estima un monto aproximado de construcción de US\$200 mil (marzo 2016), que actualizado a enero 2017 corresponde a US\$206.8 mil.

Este monto será considerado dentro del costo de inversión inicial para las tecnologías de LAC e IFAS, aplicándolo dentro del rubro de preparación del terreno de la clasificación de Haandel y Lubbe (2012).

La tecnología de MBR no requiere el uso del terreno Tajo Norte en ninguna de sus etapas, como se aprecia en el plano N°3 presentado anteriormente en la Figura 38, por lo que tampoco requiere la construcción del túnel. Esto implica una reducción de la inversión inicial con respecto a las tecnologías de LAC e IFAS.

6.2.2. Costos de inversión estimados en la propuesta de LAC

La oferta económica presentada por Acciona Agua S.A.U. desglosa detalladamente los montos por suministros-materiales y construcción únicamente de la etapa I, según lo solicitado por el AyA en la L.P.I. No. 2008LI-00002-PRI *Documento de Bases: Propuestas Formales (Volumen II)*, donde se

indica “desglosar el precio total del contrato en los componentes detallados en los formularios 5a, 6a, 7a, 8a y 9a” (AyA, 2010), documentos en los cuales se desglosan los precios de: ingeniería de detalle, construcción (incluido equipamiento), puesta en servicio, transferencia tecnológica y asistencia a la O&M. No se solicitan los montos detallados para la etapa intermedia y etapa II, por lo que Acciona Agua S.A.U indica los costos globales estimados para ambas etapas, los cuales se muestran en el Cuadro 68.

Cuadro 68. Montos globales de construcción de la etapa intermedia y etapa II para la PTAR Los Tajos

Etapas	Obras de construcción	Costo global (millones de US\$)
Intermedia	Tratamiento biológico y ampliaciones complementarias para caudal de la etapa I	44,4 (*)
II	Tratamiento biológico y ampliaciones complementarias para caudal de la etapa II	28,6
Nota (*): El monto estimado incluye el costo de la construcción del túnel, propuesto como conexión entre los terrenos Tajo Sur y Tajo Norte.		

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

Los costos de las obras a ampliar de la etapa I a las siguientes, se estimaron a partir de los montos detallados por unidad de tratamiento para la etapa I, así como con la información de las ampliaciones de las unidades de tratamiento y edificaciones para la etapa intermedia y etapa II (Cuadro 69). La Figura 27 (presentada en la sección 5.2.2), muestra el prediseño de sitio con la ampliación de unidades por etapas, según la propuesta de Acciona Agua S.A.U.

Cuadro 69. Unidades de tratamiento a ampliar en cada etapa

Unidades de tratamiento	Cantidad de líneas/unidades de tratamiento		
	Etapas I	Etapas intermedia	Etapas II
Rejillas de impacto	2	-	-
Desbaste de gruesos	2	-	-
Desbaste de finos	2	-	-
Desarenado-desengrase	3	-	2
Reparto a sedimentación primaria	4	-	2
Sedimentación primaria	4	-	2
Tratamiento biológico	-	6	2
Edificio soplantes biológicos	-	1	-
Arqueta sedimentación secundaria	-	3	2
Sedimentación secundaria	-	12	4
Espesamiento primario	2	-	1
Digestores	2	2	2
Gasómetros	2	1	1
Tratamiento biogás	1	1	1
Tratamiento desodorización	1	-	1
Silos de almacenamiento lodos	2	2	2
Depósito tampón	1	-	-
Antorchas	1	1	1

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

6.2.2.1. Costos del control automatizado

Se realizó un análisis porcentual de los costos de los “sistemas de control y automatización” detallados en el presupuesto de la etapa I, aportado en la oferta económica de Acciona Agua S.A.U. Se seleccionaron todos los componentes de la etapa I que requieren de sistemas de control y automatización. Se excluyeron de esta selección los componentes: nivelación de terreno, obras de protección en el río, sistemas de alcantarillado pluvial y sanitario, construcción de calles, entre otros.

Conociendo los costos de los componentes seleccionados y el costo reportado para los “sistemas de control y automatización”, se determinó que el 3,91% del costo total de la obra corresponde a los “sistemas de control y automatización”, considerando únicamente los rubros que requieren de estos sistemas.

Debido a que se cuenta únicamente con un presupuesto detallado para la etapa I, este porcentaje de 3,91% se aplicará para las líneas y unidades de tratamiento que serán ampliadas en las etapas posteriores (intermedia y II), correspondientes a las secciones de: pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento de olores y tratamiento de lodos, según las cantidades indicadas en el Cuadro 69.

Las unidades del tratamiento secundario (que serán construidas en la etapa intermedia y etapa II), tendrán un porcentaje mayor (según la tecnología específica), pues los procesos de tratamiento secundario requieren el control y monitoreo de parámetros biológicos, por medio de sistemas de automatización más complejos que los de las etapas previas. Este porcentaje se determinará más adelante.

Los siguientes cuadros resumen los costos estimados para los componentes a ampliar de la etapa I a la etapa intermedia (Cuadro 70), y de la etapa I a la etapa II (Cuadro 71), donde se indica el componente de “sistemas de control y automatización”, calculado como el 3,91% del total de la obra, considerando únicamente la construcción de unidades de tratamiento a ampliar entre las etapas.

Cuadro 70. Costos estimados para los componentes a ampliar de la etapa I a la etapa intermedia.

Unidades de tratamiento	Etapa I		Etapa intermedia	
	Monto total (miles US\$)	Porcentaje del total (%)	Monto total (miles US\$)	Porcentaje del total (%)
Biodigestores anaeróbicos	2.992,0	52,49	2.992,0	55,27
Gasómetro	550,0	9,65	275,0	5,08
Antorchas para quema de biogás	63,5	1,11	63,5	1,17
Tratamiento biogás	1.070,0	18,77	1.070,0	19,77
Sistema de carga, transporte y almacenamiento lodos	801,5	14,06	801,5	14,81
Sistema de control automatizado (3,91%)	223,0	3,91	211,5	3,91
Total (con control automatizado)	5.700,0	100	5.413,5	100

Fuente: Adaptado de Acciona Agua, S.A.U., 2010.

Cuadro 71. Costos estimados para los componentes a ampliar de la etapa I a la etapa II.

Unidades de tratamiento	Etapa I		Etapa intermedia	
	Monto total (miles US\$)	Porcentaje del total (%)	Monto total (miles US\$)	Porcentaje del total (%)
Separación de grasas y aceites	645,8	3,35	430,5	3,01
Desarenadores y estructuras complementarias	1.340,0	6,96	892,8	6,24
Sedimentadores primarios y estructuras complementarias	6.502,0	33,77	3.251,0	22,71
Estructuras de distribución	170,0	0,88	85,0	0,59
Sistema de remoción de natas, grasas y espumas (con su respectivo almacenaje y disposición)	936,7	4,87	468,5	3,27
Biodigestores anaerobios	2.992,0	15,54	2.991,6	20,90
Gasómetro	550,0	2,86	275,0	1,92
Antorchas para quema de biogás	63,3	0,33	63,3	0,44
Tratamiento biogás	1.070,0	5,56	1.070,0	7,47
Control de olores	801,5	4,16	801,5	5,60
Sistema de carga, transporte y almacenamiento lodos	3.428,0	17,81	3.428,0	23,94
Sistema de control automatizado (3,91%)	753,0	3,91	560,0	3,91
Total (con control automatizado)	19.252,3	100	14.317,2	100

Fuente: Adaptado de Acciona Agua, S.A.U., 2010.

6.2.2.2. Costos estimados tratamiento biológico

El costo aproximado para la infraestructura exclusiva del tratamiento biológico mediante la tecnología LAC (prediseñado por Acciona Agua S.A.U.), se estimó a partir de la diferencia entre los costos globales de ambas etapas (Cuadro 68) y los costos estimados para los componentes a ampliar en la etapa intermedia y etapa II (Cuadro 71). El Cuadro 72 muestra dichos valores estimados.

Cuadro 72. Costos estimados para el tratamiento biológico por medio de LAC de la etapa intermedia y la etapa II (basados en costos del 2010)

Costos por secciones	Monto total (miles de US\$)	
	Etapa intermedia	Etapa II
Costo global (Acciona Agua S.A.U.)	44.400,0	28.600,0
Ampliaciones complementarias	5.413,5	14.317,2
Tratamiento secundario	38.986,5	14.282,8

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

Los costos presentados en el Cuadro 72 no han sido proyectados a valor presente, son valores extraídos de los costos indicados por Acciona Agua S.A.U. en su oferta económica (2010). Para el análisis financiero y la comparación entre las diferentes tecnologías, es necesario proyectar estos costos a valor presente (al 2017). Se utilizará la tasa de interés de 2,88%, la cual corresponde al promedio de los últimos 7 valores (enero del 2010 a enero del 2017) del Índice de Precios al Productor Industrial (IPPI) con combustible del BCCR, siendo este índice el más representativo que comprende todas las actividades productivas (BCCR, 2017b). Al realizar este reajuste, los montos estimados para el tratamiento biológico se detallan en el Cuadro 73.

Cuadro 73. Valor presente (al 2017) de los costos estimados para el tratamiento biológico de LAC para la etapa intermedia y la etapa II

Etapa de tratamiento	Monto (miles de US\$)	
	Etapa intermedia	Etapa II
Tratamiento secundario	47.548,30	17.419,44

Fuente: Acciona Agua S.A.U, 2010.

Utilizando como guía la clasificación de rubros de inversión de Haandel y Lubbe (2012) presentada en el Cuadro 67 y a partir del monto –proyectado a valor presente (enero 2017) – referente al costo total de implementar la tecnología LAC, a continuación se estima el desglose de los costos de inversión clasificados por cada rubro. Algunos aspectos son más importantes dependiendo de las condiciones previas del sitio, existiendo un contrapeso entre los rubros según cada etapa, por lo que a criterio se consideran diferentes porcentajes del costo de inversión en la etapa intermedia y etapa II.

Cuadro 74. Desglose de costos de inversión por rubro para la implementación de la tecnología LAC en la PTAR Los Tajos

Rubro	Etapa intermedia		Etapa II	
	Costo por rubro (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo por rubro (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)
1. Preparación	3.090,64	6,5	783,87	4,5
1.1.Preparación del terreno	1.664,19	3,5	435,49	2,5
1.2.Preparación de la infraestructura	1.426,45	3,0	348,39	2,0
2. Construcción	36.374,45	76,5	13.674,26	78,5
2.1.Civil	15.928,68	33,5	5.922,61	34,0
2.2.Mecánica	5.230,31	11,0	2.090,33	12,0
2.3.Eléctrico e instrumentación	4.992,57	10,5	1.916,14	11,0
2.4.Tuberías de interconexión	2.377,42	5,0	870,97	5,0
2.5.Centro de control del proceso	2.852,90	6,0	1.045,17	6,0
2.6.Contingencia	4.992,57	10,5	1.829,04	10,5
3. Puesta en marcha	950,97	2,0	348,39	2,0
4. Adicionales	7.132,25	15,0	2.612,92	15,0
TOTAL	47.548,30	100	17.419,44	100

Nota: Estos costos no incluyen el costo de adquisición del terreno.

Fuente: Adaptado de Haandel y Lubbe, 2012.

6.2.3. Costos de inversión estimados para el prediseño de la tecnología IFAS

Los costos de inversión de la implementación de la tecnología IFAS, se obtienen a partir del prediseño realizado. Debido a las limitaciones y alcances de este TFG, no se cotizaron todos los rubros de inversión tales como preparación del terreno, tuberías, instrumentación, entre otros. Se cotizaron únicamente los rubros de construcción, equipamiento y paquete de IFAS, con diferentes proveedores, tanto nacionales como internacionales.

El costo total de inversión para la tecnología IFAS se obtuvo a partir de los rubros principales cotizados y los porcentajes de la clasificación de Haandel y Lubbe (2012) (Cuadro 67).

6.2.3.1. Diseño, biosoportos y sistema de aireación para los reactores IFAS (paquete IFAS)

Los módulos de biorreactores de la tecnología IFAS se prediseñaron con un caudal de 30.000 m³/d, discutido anteriormente en la sección 5.3.3.1. El costo presupuestado por Headworks Bio Inc. por cada módulo es de US\$839.000 CIF en Costa Rica a enero del 2016 (Anexo A-1), monto que actualizado al 2017 (con el índice de inflación de EE.UU. de 2,5%) corresponde a US\$859.975,00 (Worldwide Inflation Data, 2017b). Este rubro se denominará “paquete IFAS” e incluye: diseño del sistema, biosoportos (ActiveCell 920), tuberías de aireación y difusores de burbuja gruesa (para los biorreactores IFAS), costos de transporte y 2 visitas al sitio por parte de expertos de Headworks para la puesta en marcha del sistema.

La propuesta de Headworks no incluyó un desglose de costos por rubro del “paquete IFAS”. Es importante contar con costos detallados, por lo que con criterio técnico y la experiencia del proyecto en la PTAR El Roble, fue posible estimar los costos de inversión por rubro para la totalidad de módulos (9 en la etapa intermedia y 4 adicionales en la etapa II).

Cuadro 75. Desglose de costos por rubros del “paquete IFAS” cotizado por la empresa Headworks para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Rubro	Porcentaje por rubro (%)	Costo por rubro (miles de US\$)	
		Etapla intermedia	Etapla II
1.Biosoportos (únicamente celdas plásticas)	45	3.482,90	1.547,96
2.Tuberías y accesorios (cilindros, pantallas, difusores)	30	2.321,93	1.031,97
3.Ingeniería y administración (diseño, utilidades)	15	1.160,97	515,99
4.Puesta en marcha	10	773,98	343,99
Total	100	7.739,78	3.439,90

Fuente: Headworks Bio Inc. 2016.

Los costos anteriores corresponde a CIF⁵ Costa Rica. Sin embargo, no contemplan el impuesto de ventas (13%), la tarifa de la Ley N°6946 aplicable sobre el valor aduanero (1%), transporte al sitio (aprox. 5%), desalmacenaje y otros gastos (aprox. 1%). Así mismo, tampoco contemplan el monto por instalación en la PTAR, lo que se estima para mano de obra un 17% de la instalación de tuberías y accesorios, y un 3% por el alquiler de la grúa para la instalación de los biosoportos. Estos rubros adicionales incrementan el monto presupuestado por Headworks, lo que se puede apreciar en el Cuadro 76.

Cuadro 76. Costo total por rubro para el paquete IFAS con costos adicionales estimados

Rubro	Desglose del costo (miles de US\$)	
	Etapla intermedia	Etapla II
1. Biosoportos (únicamente celdas plásticas)	3.482,90	1.547,96
<i>Total de impuestos y tarifas</i>	940,38	417,95
<i>Instalación</i>	104,49	46,44
SUBTOTAL: biosoportos	4.527,77	2.012,34
2. Tuberías y accesorios (cilindros, pantallas, tuberías de aireación, difusores burbuja gruesa)	2.321,93	1.031,97
<i>Total de impuestos y tarifas</i>	464,39	206,39
<i>Instalación</i>	394,73	175,43
SUBTOTAL: tuberías y accesorios	3.181,05	1.413,80
3. Ingeniería y administración (Diseño, utilidades)	1.160,97	515,99
4. Puesta en marcha	773,98	343,99
TOTAL	9.643,76	4.286,12

Fuente: Headworks Bio Inc. 2016.

6.2.3.2. Obra Civil

Los costos de la construcción (obra civil) de las unidades de tratamiento del sistema prediseñado IFAS, fue aportado por la empresa costarricense Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA).

Las obras cotizadas corresponden a la infraestructura principal del tratamiento secundario: reactores LAC e IFAS, sedimentadores secundarios y el edificio para los sopladores de los reactores LAC. Se recomienda que los sopladores de los reactores IFAS -por sus grandes dimensiones- queden expuestos al exterior, para no dificultar su instalación y las labores de mantenimiento.

No se realizó un diseño estructural detallado para las obras prediseñadas, únicamente se determinaron espesores preliminares de concreto, tanto para los muros como para las losas de piso de las edificaciones.

⁵ CIF: Siglas en inglés de *Cost Insurance Freight* que significa “Costo Seguro y Fletes”. Es el valor sobre el cual se calculan los Impuestos de Aduana.

Basándose en precios unitarios estándar de obra de concreto por parte de la empresa SOLAMSA, se procede a realizar el presupuesto de la construcción de los mismos (al 2016). Los costos unitarios se actualizaron a enero del 2017, mediante el Índice de Precios del Sector Construcción (para edificaciones) del INEC. El Cuadro 77 indica los costos actualizados.

Cuadro 77. Costos de obra civil por componente de infraestructura para la tecnología IFAS (etapa intermedia y II)

Etapas del proyecto	Unidad de infraestructura	Cantidad	Costo unitario (US\$/m²)	Área unitaria (m²)	Costo total (miles US\$)
Etapas intermedia	Reactores biológicos (IFAS y LAC)	9	1.581,0	256	3.642,63
	Edificio de sopladores LAC (+ grúa)	1	1.041,8	195	213,23
	Sedimentadores secundarios	8	503,7	1.662	6.697,39
	Subtotal: obra civil etapas intermedia				10.553,25
Etapas II	Reactores biológicos (IFAS y LAC)	4	1.581,0	256	1.618,95
	Sedimentadores secundarios	4	503,7	1.662	3.348,69
	Subtotal: obra civil etapas II				4.967,64
Nota: * El costo del edificio de sopladores (etapa intermedia), incluye el costo de la grúa estimado en US\$10.418.					

Fuente: SOLAMSA, 2015 y 2016.

6.2.3.3. Equipamiento

El costo del equipamiento se obtuvo por medio de cotizaciones con diversas empresas nacionales e internacionales, así como reuniones con expertos en equipo electromecánico que aportaron -según su área de competencia- recomendaciones de tipos, marcas y modelos.

Los equipos cotizados corresponden únicamente a los más representativos del tratamiento secundario, a saber: sopladores, difusores de burbuja fina, rasquetas barrelos (sedimentadores secundarios), bombas para recirculación y purga de lodos. No se realizaron cotizaciones de los equipos complementarios, tales como bombas de vaciado, bomba de achique y desagüe de cámaras, entre otros equipos pequeños que se encuentran fuera del alcance de este TFG.

Además de los datos del prediseño del sistema IFAS, para las cotizaciones de equipo fue necesario realizar cálculos aproximados y suposiciones de aspectos como: caudales de agua residual o de lodos, requerimientos de aire, tamaño de tuberías, niveles topográficos, cargas dinámicas, entre otros datos preliminares. Los Anexos del A-2 al A-5 detallan las ofertas aportadas por las empresas consultadas, las cuales se realizaron entre diciembre del 2015 y marzo del 2016. El Cuadro 78 resume las marcas, los modelos y las empresas que importan los equipos cotizados para la PTAR Los Tajos.

Cuadro 78. Marcas y modelos del equipamiento mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)

Equipo	Marca	Modelo	Proveedor
Sopladores (Biorreactor IFAS)	Gardner Denver (Hoffman Lamson)	Multi-Stage Centrifugal Series Blower, Model 2405	Gardner Denver (Brasil)
Sopladores (Biorreactor LAC)	Gardner Denver	Soplador de desplazamiento positivo, tubular. CycloBlower 11CDL31	Gardner Denver
Difusores de burbuja fina	SAM HWAN	Difusor de membrana circular. SH500 MDD	SOLAMSA
Rasquetas barrelosos	Procesos Auto-Mecanizados (PAM)	Equipamiento Decantador Circular. PAM DC	PAM (España)
Bombas recirculación de lodos	Sulzer	XFP501U SK3.590 PE1250/8, 125 KW, 860 rpm	Hidrotica
Bombas purga de lodos	Sulzer	XFP150G CB1.2 PE110/6-G 11 KW, 1190 rpm	Hidrotica

El Cuadro 79 muestra los costos del equipo para la implementación de la tecnología IFAS, con los costos actualizados a enero del 2017, por medio de los respectivos índices de inflación de los países que cotizaron equipo: EE.UU., Brasil y España (Worldwide Inflation Data; 2017a, 2017b y c) y el Índice de Precios del Sector Construcción (para edificaciones) en Costa Rica (INEC, 2017).

Los montos indicados en el Cuadro 79 no contemplan el porcentaje de instalación de los equipos, por lo que, por recomendación de expertos en el tema (Gardner Denver, 2016; SOLAMSA, 2016a y Lazo, 2016), se asumirá un 22% del costo del equipo. Por otra parte, debido a que no se cotizaron los equipos complementarios (bombas de vaciado, de achique y desagüe, entre otros) para la obtención del costo total aproximado de la implementación de la tecnología IFAS, se agregó un 15% al monto total de equipo para ambas etapas. Finalmente, el monto total para el rubro de equipamiento (incluyendo su instalación) se estima en US\$5,63 millones para la etapa intermedia y US\$2,47 millones para la etapa II.

Cuadro 79. Costos correspondientes al equipamiento mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)

Cuadro 13: Costos correspondientes al equipamiento mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)							
Etapas del proyecto	Equipo	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Impuesto Venta 13% (US\$)	Flete, impuestos aduana y otros (US\$)	Costo total (miles US\$)	Notas
Etapa intermedia	Sopladores (biorreactor IFAS)	3	493.150,9	64.109,6	138.082,3	2.086,0	(1)
	Sopladores (biorreactor LAC)	5	124.073,2	16.129,5	6.203,7	732,0	(2)
	Paneles velocidad fija	4	20.678,9	2.688,3	1.033,9	97,6	(2)
	Paneles velocidad variable	1	36.188,0	4.704,4	1.809,4	42,7	
	Difusores de burbuja fina	1.170	130,8	17,0	6,5	180,5	
	Rasquetas barrelos	8	58.378,7	7.589,2	4.086,5	560,4	(3)
	Bombas de recirculación de lodos	4	93.299,7	12.129,0	933,0	425,4	(4)
	Bombas de purga de lodos	4	12.370,4	1.608,1	123,7	56,4	(4)
	Subtotal: equipamiento etapa intermedia						4.181,2
Etapa II	Sopladores (biorreactor IFAS)	1	493.150,9	64.109,6	138.082,3	695,3	(1)
	Sopladores (biorreactor LAC)	3	124.073,2	16.129,5	6.203,7	439,2	(2)
	Paneles velocidad fija	2	20.678,9	2.688,3	1.033,9	48,8	
	Paneles velocidad variable	1	36.188,0	4.704,4	1.809,4	42,7	
	Difusores de burbuja fina	520	130,8	17,0	6,5	80,2	(2)
	Rasquetas barrelos	4	58.378,7	7.589,2	4.086,5	280,2	(3)
	Bombas de recirculación de lodos	2	93.299,7	12.129,0	933,0	212,7	(4)
	Bombas de purga de lodos	2	12.370,4	1.608,1	123,7	28,2	(4)
	Subtotal: equipamiento etapa II						1.827,4
Notas:							
(1) Costo unitario no contempla impuestos en C.R., desalmacenaje y transporte. Se agrega un total de 28% por: flete internacional a C.R., impuesto de aduanas, desalmacenaje, trasporte a la PTAR y otros cobros adicionales.							
(2) Costo unitario ya contempla impuestos en C.R. y desalmacenaje. Se agrega un total de 5% por transporte al sitio.							
(3) Costo unitario es CIF Limón, no incluye impuesto de ventas (13%), aduanas (1%), desalmacenaje (1%) y transporte a la PTAR (5%). El costo de la cotización es en euros y fue transformado a US\$ mediante tipo de cambio del BCCR promedio del 1 al 31 de enero 2017 (BCCR, 2017c).							
(4) Costo unitario incluye transporte hasta la PTAR. Incluye todos los impuestos excepto 1% por la Ley N°6946.							

Fuente: Gardner Denver, 2016a y 2016b; SOLAMSA, 2015; PAM, 2015; Hidrotica, 2016.

6.2.3.4. Control automatizado

El cálculo del rubro de control automatizado, analizó el proyecto “*Suministro, instalación y puesta en marcha de un sistema de tratamiento de aguas residuales bajo la modalidad IFAS (Integrated Fixed-Film Activated Sludge System) en la PTAR El Roble, Puntarenas*”, determinando el porcentaje que correspondió a este rubro del total de la obra. El resultado del análisis indicó que el 7,22% del costo total del proyecto les compete a los sistemas de control automatizado.

El proyecto de la PTAR El Roble, al ser una rehabilitación y no un proyecto completamente nuevo, cuenta con un porcentaje más elevado correspondiente a control y automatización. El porcentaje a utilizar para la PTAR Los Tajos fue del 6% para este rubro, tanto para la etapa intermedia como para la etapa II.

6.2.3.5. Desglose de costos de inversión de la implementación de la tecnología IFAS

Similar al desglose de rubros de los costos de inversión utilizado para la tecnología LAC, el cual se basa en la clasificación y los rangos de Haandel y Lubbe (2012), se estima el costo total de inversión de la implementación de la tecnología IFAS para ambas etapas.

Algunos de los porcentajes y de los rubros de la tecnología IFAS difieren de la tecnología LAC, por las variaciones específicas de cada caso, por ejemplo, según el prediseño realizado para la PTAR Los Tajos, el sistema de la tecnología IFAS es más compacto que para la tecnología LAC, reduciendo la infraestructura a construir y por ende, el porcentaje del rubro “civil”. Se incorporó un nuevo rubro a esta clasificación denominado “biosoportos” (que incluye las celdas plásticas y equipo complementario de la tecnología) resultando un porcentaje importante para el proyecto. El rubro de “mecánica” se redujo considerablemente, pues en este caso, el equipo mecánico fue cotizado y existen algunos otros rubros que son de mayor peso en esta tecnología.

Similar a la tecnología LAC, también para la tecnología IFAS algunos porcentajes son diferentes entre las etapas (intermedia y II), principalmente aquellos propios del proyecto (preparación del terreno, construcción del túnel, etc.). El Cuadro 80 muestra los resultados de este desglose de costos de inversión.

Cuadro 80. Desglose de costos de inversión estimados para la implementación de la tecnología IFAS en la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Rubro	Etapa intermedia		Etapa II	
	Costo por rubro (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo por rubro (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)
1. Preparación	2.624,38	5,0	686,30	3,0
1.1.Preparación del terreno	1.573,08	3,0	457,22	2,0
1.2.Preparación de la infraestructura	1.051,30	2,0	229,08	1,0
2. Construcción	40.956,59	78,0	18.292,79	80,0
2.1.Civil	10.553,25	20,1	4.967,64	21,7
2.2.Biosoportos y accesorios	7.708,82	14,7	3.426,14	15,0
2.3.Mecánica	5.633,49	10,7	2.469,87	10,8
2.4.Eléctrico e Instrumentación	5.773,12	11,0	2.514,72	11,0
2.5.Tuberías de interconexión	2.626,96	5,0	1.143,05	5,0
2.6.Centro de control del proceso	3.148,74	6,0	1.371,66	6,0
2.7.Contingencia	5.512,23	10,5	2.399,71	10,5
3. Puesta en marcha	1.047,78	2,0	456,30	2,0
4. Adicionales	7.874,31	15,0	3.429,30	15,0
TOTAL	52.503,06	100	22.864,69	100
Nota: Estos costos no incluyen el costo de adquisición del terreno.				

Fuente: Adaptado de Haandel y Lubbe, 2012.

6.2.4. Costos de inversión estimados para el prediseño de la tecnología MBR

Similar a la estimación realizada para la tecnología IFAS, para la tecnología de MBR se realizaron diferentes cotizaciones de los rubros más importantes: construcción, sistema de membranas y equipos complementarios.

6.2.4.1. Diseño y sistema MBR (paquete de membranas)

La empresa Evoqua presupuestó como un sólo paquete: el diseño del sistema mediante la tecnología MBR, el equipo requerido, su instalación y dirección técnica; por un monto total de US\$29,5 millones para la etapa intermedia (costos a febrero del 2016), y de US\$14 millones para la etapa II (costos a abril del 2016), montos que, actualizados a enero del 2017, corresponden a US\$30,21 millones y US\$14,21 millones para las etapas respectivas. Las ofertas completas de Evoqua se presentan en los Anexos B-1 y B-2.

El equipo incluido en la cotización corresponde a: módulos de membranas; tuberías y válvulas propias del sistema; equipos motorizados, neumáticos y eléctricos; sistema de control automatizado, etc. Todo lo anterior se denominará como “paquete membranas”. La propuesta de Evoqua no incluía un desglose de costos, esta estimación se realizó por medio de criterio técnico y estudios de casos revisados de proyectos de MBR de la misma empresa. La estimación de los costos de inversión se desglosa en el Cuadro 81.

Cuadro 81. Desglose de costos por rubro del “paquete membranas” cotizado por Evoqua para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Rubro	Porcentaje por rubro (%)	Costo por rubro (miles US\$)	
		Etapla intermedia	Etapla II
1. Sistema de Membranas	43	12.988,5	6.108,9
2. Equipo mecánico y neumático	20	6.041,2	2.841,4
3. Eléctrico e Instrumentación	15	4.530,9	2.131,0
4. Tuberías de interconexión	8	2.416,5	1.136,5
5. Ingeniería y administración	7	2.114,4	994,5
6. Instalación	7	2.114,4	994,5
Total	100	30.205,8	14.206,8

Fuente: Evoqua, 2016a.

El Cuadro 81 permite identificar que el costo más importante es el sistema de membranas, pues esto abarca toda la estructura soportante de los racks de las membranas, los módulos y las membranas de fibra hueca propuestas. Así mismo, la empresa incluye un porcentaje para instalación (7%), pues la colocación y el montaje de todo el sistema debe ser realizado por expertos en la tecnología.

Los costos anteriores no incluyen transporte a Costa Rica, tampoco impuestos aduaneros, impuestos de venta, ni tarifa por flete, por lo que a los rubros de: “sistemas de membranas” y “eléctrico e instrumentación” se les adicionará el impuesto de ventas (13%), la tarifa de la Ley N°6946 (1%), aranceles de importación (5%), transporte a la PTAR (5%). Los rubros de “equipo mecánico y neumático” y “tuberías de interconexión” tendrán los mismos porcentajes adicionales por impuestos y transporte, excepto el 5% por aranceles de importación, suponiendo que estos materiales se encuentran en partidas donde se exonera del Derecho Arancelario a la Importación (DAI). El Cuadro 82 muestra los resultados de la incorporación de estos costos al paquete de membranas.

Cuadro 82. Costo total por rubro para el paquete membranas con costos adicionales estimados

Rubro	Desglose del costo (miles US\$)	
	Etapas intermedia	Etapas II
1. Sistema de membranas (módulos, soportes, membranas)	12.988,5	6.108,9
<i>Total de impuestos y tarifas</i>	3.766,7	1.771,6
SUBTOTAL: Sistema de membranas	16.755,1	7.880,5
2. Equipo mecánico y neumático	6.041,2	2.841,4
<i>Total de impuestos y tarifas</i>	1.449,9	681,9
SUBTOTAL: Equipo mecánico y neumático	7.491,0	3.523,3
3. Eléctrico e instrumentación	4.530,9	2.131,0
<i>Total de impuestos y tarifas</i>	1.314,0	618,0
SUBTOTAL: Eléctrico e instrumentación	5.844,8	2.749,0
4. Tuberías de interconexión	2.416,5	1.136,5
<i>Total de impuestos y tarifas</i>	580,0	272,8
SUBTOTAL: Tuberías e interconexión	2.996,4	1.409,3
5. Ingeniería y administración (diseño, utilidades)	2.114,4	994,5
6. Instalación	2.114,4	994,5
TOTAL	37.316,2	17.551,1

Fuente: Evoqua, 2016a.

6.2.4.2. Obra Civil

La empresa Evoqua no construye infraestructura, por lo que similar a la tecnología IFAS, la estimación de la construcción de obra civil fue cotizada a la empresa costarricense SOLAMSA. Los montos estimados para cada unidad de tratamiento (actualizados a enero del 2017) se resumen en el Cuadro 83.

Cuadro 83. Resumen de costos de obra civil para la implementación de la tecnología de MBR en la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II).

(Etapa intermedia y Etapa II).					
Etapa del proyecto	Unidad de infraestructura	Cantidad	Costo unitario (US\$/m²)	Área unitaria (m²)	Costo total (miles US\$)
Etapa intermedia	Biorreactor biológico	16	1.041,8	1.002,8	16.715,7
	Biorreactor de membranas (MOS)	12	520,9	96,4	602,3
	Edificio de sopladores del sistema biológico	1	1.041,8	71,4	74,4
	Edificios complementarios varios*	1	468,8	481,7	225,8
	Subtotal: obra civil etapa intermedia				17.618,2
Etapa II	Biorreactor biológico	8	1.041,8	1.002,8	8.357,9
	Biorreactor de membranas (MOS)	6	520,9	96,4	301,1
	Edificio de sopladores del sistema biológico	1	1.041,8	35,7	37,2
	Edificios complementarios varios*	1	468,8	240,8	112,9
	Subtotal: obra civil etapa II				8.809,1
Notas:					
(*): Los edificios complementarios comprenden: edificio de pre-rejillas, edificio de sopladores para membranas, para bombas de alimentación de las membranas y para limpieza de las membranas. Cabe indicar que las dimensiones de estas estructuras fueron aportadas preliminarmente por parte de Evoqua, quienes indicaron que este dato se afinaría para una propuesta final.					
(MOS): Sistema de Operación de Membranas, por sus siglas en inglés <i>Membrane Operating System</i> .					

Fuente: SOLAMSA, 2016; Evoqua, 2016a y 2016b.

6.2.4.3. Equipamiento

La mayor parte del equipamiento está incluida en el paquete de Evoqua; sin embargo, no se incluyen las rejillas previas al ingreso de los tanques biológicos, recomendadas en un tamaño menor a 1,5 mm, pues este es un requisito de esta tecnología dentro del pretratamiento.

Se cotizaron los tamices rotatorios de la empresa PAM de España, quienes recomendaron el modelo de equipo tipo *Tandem* (3 rototamices por cada equipo) necesarios para eliminar los sólidos mayores a 1,0 mm (Anexo B-4). El costo de este equipo actualizado a enero del 2017 se presenta en el Cuadro 84.

Cuadro 84. Costos por equipamiento adicional para la PTAR Los Tajos, mediante la tecnología de MBR

Etapas del proyecto	Equipo	Cantidad	Costo unitario (US\$)	Impuesto de venta 13% (US\$)	Flete, impuestos aduana y otros (US\$)	Instalación 20% (US\$)	Costo total (miles US\$)
Etapa intermedia	Rototamiz Tandem (1 mm)	2	123.037,4	15.994,9	7.382,2	24.607,5	342,04
Etapa II	Rototamiz Tandem (1 mm)	1	123.037,4	15.994,9	7.382,2	24.607,5	171,02
Notas: -Costo unitario es CIF Limón, no incluye impuesto de ventas (13%), aduanas (1%), desalmacenaje (1%) y transporte a la PTAR (5%). -El costo de la cotización es en euros y fue transformado a US\$ mediante tipo de cambio del BCCR promedio del 1 al 31 de enero del 2017 (BCCR, 2017c).							

Fuente: PAM, 2016.

6.2.4.4. Control automatizado

La tecnología MBR requiere un estricto control automatizado de sus unidades de tratamiento, por lo que este rubro es muy importante dentro de los costos de inversión. Se utilizó un porcentaje mayor que el utilizado para las tecnologías LAC e IFAS, eligiéndose con criterio técnico un 9% para etapa intermedia y de 8% para la etapa II. Esto se ve reflejado en el rubro de “centro de control del proceso” que se presenta en el Cuadro 85 del siguiente apartado.

6.2.4.5. Desglose de costos de inversión de la implementación de la tecnología MBR

La estimación del costo total de inversión de la implementación de la tecnología MBR (en ambas etapas), desglosado en todos los rubros que componen dicho costo, utilizó como base la clasificación y los rangos de Haandel y Lubbe (2012). Similar a la tecnología IFAS, se realizaron algunas modificaciones en los rangos típicos de porcentajes por las características específicas de la tecnología MBR.

Al comparar los porcentajes con respecto a las tecnologías de LAC, existe un menor porcentaje en lo que corresponde a la preparación del terreno (en esta tecnología no se requiere la construcción del túnel ni la preparación del terreno Tajo Norte), menor porcentaje en construcción civil, mayor porcentaje en las actividades de puesta en marcha, mayor porcentaje en los componentes eléctricos e instrumentación, entre otras variantes.

El MBR, por ser una tecnología avanzada, requiere mucho detalle en todo el proceso, incluida una puesta en marcha muy rigurosa, por ello, el porcentaje del rubro de “Puesta en marcha” es más elevado que los estimados para las tecnologías LAC e IFAS, pasando de 2% a 4% en ambas etapas.

Como parte de esta estimación, se utilizó la cotización de la empresa Evoqua, que considera dentro del “paquete de membranas” componentes de los rubros: mecánica, eléctrico e instrumentación, tuberías de interconexión, ingeniería y administración e instalación (Cuadro 81). El rubro de “mecánica” incluye los costos de: (1) equipo mecánico y neumático (del “paquete de membranas”), (2) equipo adicional y (3) componente de instalación (del “paquete de membranas”).

Diferenciando entre las dos etapas para la tecnología MBR, algunos de los porcentajes de los rubros son levemente distintos principalmente para el rubro de “preparación del terreno”, el de “civil” y el de “centro de control del proceso”.

El Cuadro 85 desglosa los costos totales de inversión estimados de la implementación de la tecnología

MBR para ambas etapas.

Cuadro 85. Desglose de costos de inversión estimados para la implementación de la tecnología MBR en la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Rubro	Etapa intermedia		Etapa II	
	Costo por rubro (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo por rubro (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)
1. Preparación	3.110,94	3,0	1.208,54	2,5
1.1.Preparación del terreno	2.076,71	2,0	723,81	1,5
1.2.Preparación de la infraestructura	1.034,23	1,0	484,74	1,0
2. Construcción	80.948,50	78,0	37.988,01	78,5
2.1.Civil	17.618,19	17,0	8.809,10	18,2
2.2.Sistema de membranas	16.755,15	16,1	7.880,51	16,3
2.3.Mecánica	10.263,17	9,9	4.846,63	10,0
2.4.Eléctrico e instrumentación	11.412,05	11,0	5.321,96	11,0
2.5.Tuberías de interconexión	5.183,58	5,0	2.420,37	5,0
2.6.Centro de control del proceso	9.335,57	9,0	3.869,98	8,0
2.7.Contingencia	10.380,80	10,0	4.839,46	10,0
3. Puesta en marcha	4.147,92	4,0	1.936,31	4,0
4. Adicionales	15.564,88	15,0	7.257,77	15,0
TOTAL	103.772,24	100	48.390,64	100
Nota: Estos costos no incluyen el costo de adquisición del terreno.				

Fuente: Modificado de Haandel y Lubbe, 2012; Evoqua, 2016a y 2016b.

6.2.5. Resumen de los costos de inversión de todas las tecnologías estudiadas

El Cuadro 86 resume los costos estimados totales en valor presente a enero del 2017 para la inversión inicial, por cada tecnología analizada.

Cuadro 86. Resumen de costos de inversión de la implementación del tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos, según cada tecnología analizada (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Monto total (millones US\$)	
	Etapa intermedia	Etapa II
LAC	47,55	17,42
IFAS	52,50	22,86
MBR	103,77	48,39
Nota: Estos costos no incluyen el costo de adquisición del terreno.		

Como se observa en el Cuadro 86, el mayor costo de inversión corresponde a la tecnología de MBR, tanto para la etapa intermedia, como para la etapa II. La tecnología de MBR tiene un costo superior al doble de las otras dos tecnologías analizadas (en ambas etapas).

Los costos de inversión de las tecnologías de LAC e IFAS difieren entre ellas en US\$4,95 millones (etapa intermedia) y US\$5,45 millones (etapa II), lo que en porcentajes de diferencia es aproximadamente 10,42% y 31,25% (respectivamente) entre ambas tecnologías.

6.3. Costos de Operación y Mantenimiento (O&M) de las tecnologías LAC, IFAS y MBR

6.3.1. Aspectos importantes a considerar para la estimación de costos de O&M

6.3.1.1. Costos por consumo de energía

El costo del consumo energético del tratamiento secundario para todas las tecnologías analizadas, se estimó mediante la tarifa “T-MT Media Tensión”⁶ de la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), la cual es la tarifa actual de la PTAR Los Tajos. Esta tarifa es opcional para usuarios de media tensión (1.000 a 34.500 voltios), con el requisito de que se deben consumir como mínimo 120.000 kWh por año calendario (ICE, 2017), condición que la PTAR está cumpliendo desde su etapa I.

Los costos se realizan diferenciados según los periodos: punta, valle y nocturno (Cuadro 87). Las horas de funcionamiento de los equipos se distribuyeron principalmente en los períodos más críticos (punta y valle) para obtener un dato más conservador.

Cuadro 87. Costo por kWh para los diferentes períodos de cobro de la CNFL para la tarifa T-MT

Período	Cantidad de horas del período	Cargo por energía, por cada kWh (¢)	Cargo por energía, por cada kWh (US\$)
Periodo punta	5	67,13	0,118
Periodo valle	9	24,93	0,044
Periodo nocturno	10	15,34	0,027
TOTAL	24	-	-

Fuente: ICE, 2017.

Se excluye de este análisis la capacidad de producción de energía con que se cuenta en la PTAR (proveniente del tratamiento de lodos), así como lo que corresponde al cobro por factor de potencia. En el cálculo si se consideró el impuesto de venta y el cobro por alumbrado público.

6.3.1.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)

Actualmente, la PTAR Los Tajos ya cuenta con una estructura organizacional establecida, y con la cantidad de personal necesario para la etapa I, incluyendo la parte administrativa, técnica y operativa para cumplir con todas las actividades de O&M de la PTAR.

Dentro de las actividades que se realizan actualmente en la PTAR se encuentran: mantenimiento eléctrico-mecánico y electrónico de los equipos, control y monitoreo automatizado de los procesos de

⁶ Alcance No.152 de La Gaceta No.120 publicada el 26 de junio 2017.

todas las líneas de tratamiento (agua, lodos, olores), análisis de laboratorio, mantenimiento de las instalaciones, entre otras.

El personal adicional a considerar para todas las tecnologías, será únicamente el requerido por la incorporación del tratamiento secundario de la PTAR, exclusivamente para las actividades de O&M de la tecnología específica.

Los montos correspondientes a los salarios del personal, serán estimados por puesto, según el documento Índice Salarial Costo de Vida I Semestre 2017 (AyA, 2017a) y el Manual Descriptivo de Clases Institucionales más actualizado, de la Dirección de Capital Humano del AyA (AyA, 2016b). Para todos los casos, el costo total anual por salarios de personal, se calculará, suponiendo un 10% sobre el salario base por peligrosidad, así como del 36,5% del salario por cargas sociales.

6.3.1.3. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento

Es necesario realizar periódicamente los servicios de mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos mecánicos a utilizar en todas las tecnologías, tales como sopladores, bombas, equipamiento de los sedimentadores secundarios, etc., aspecto que incluye generalmente: lubricación (cambio de aceite), limpieza y reemplazo de filtros, cambio de rodamientos de empaques o sellos, etc., para asegurar un óptimo funcionamiento y alargar su vida útil.

Los costos correspondientes al mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos, se determinan según un porcentaje del costo inicial de la adquisición de los mismos, con diferentes periodicidades de aplicación según las especificaciones del equipo y criterio de experto.

Se considera para todas las tecnologías los mismos porcentajes para el mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos mecánicos: 1,5% anual correspondiente a las actividades menores (mantenimiento 1), y 5% cada 5 años para las actividades de mantenimiento más complejas (mantenimiento 2) que incluye aspectos como: compra de repuestos, reemplazo de piezas, etc. Lo anterior para simplificar los modelos del análisis financiero.

6.3.1.4. Costos de las sustancias químicas requeridas

La operación, el mantenimiento y el control de la PTAR Los Tajos en su etapa I, requiere el uso de sustancias químicas para las actividades de: tratamiento del biogás, control de olores y deshidratación para la preparación del polielectrolito como coadyuvantes para la floculación (en caso de requerirse

en los tanques de sedimentación primaria).

El presente análisis excluye los consumos de sustancias químicas correspondientes a: el tratamiento primario (línea de aguas), el tratamiento completo de lodos y el tratamiento de gases. Únicamente se tomarán en cuenta las sustancias químicas que la tecnología de tratamiento secundario requiera obligatoriamente para su correcto funcionamiento, tanto en la etapa intermedia, como en la etapa II.

6.3.1.5. Costos por tratamiento y disposición de lodos

Se excluyen del análisis financiero los costos referentes a la gestión del lodo (tratamiento, transporte y disposición), pues los lodos de desecho producidos en el tratamiento secundario (lodos secundarios), al igual que los producidos en las etapas previas (lodos primarios), se unen como lodos mixtos para ser dirigidos a la línea de tratamiento de lodos, la cual ha sido construida desde la etapa I de la PTAR Los Tajos.

No se cuantificaron los costos de la gestión de los lodos de desecho, pues para ello se requiere analizar los aportes de lodos de las unidades previas al tratamiento secundario, así como el funcionamiento de la línea de lodos, lo cual se encuentra fuera del alcance del presente TFG. Sin embargo, la producción de lodos por parte del tratamiento secundario, será considerada en el componente ambiental dentro del análisis multicriterio en la sección 7.3.3.3., donde se comparó la producción de lodos para cada tecnología.

6.3.1.6. Costos por canon ambiental

Los costos correspondientes al pago del canon ambiental por vertido, serán considerados en el análisis financiero de cada tecnología, según se establece en el Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos (Decreto Ejecutivo N° 34431-MINAE-S), componente que se detalla en la sección 6.4.

6.3.2. Costos de O&M estimados para la tecnología LAC

6.3.2.1. Costos por consumo energético de la tecnología LAC

Al utilizar los montos de cobro por el servicio eléctrico de la CNFL para la Tarifa T-MT en US\$/kWh (Cuadro 87) y a partir de los datos de potencia instalada (kW) y las horas diarias de operación de los principales equipos del tratamiento secundario, indicados en el Plan Maestro de Acciona Agua S.A.U. (sección 5.7), se obtienen los costos por el consumo energético para la etapa intermedia y para la

incorporación de la etapa II, resultados que se muestran en el Cuadro 88.

Cuadro 88. Costos anuales por consumo energético para el tratamiento secundario mediante LAC propuesto por Acciona Agua S.A.U. (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Costos anuales por consumo energético (miles US\$/año)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
LAC	1.257,40	802,37	2.059,76

Fuente: Acciona Agua, 2010; ICE, 2017.

6.3.2.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)

La UEN de Recolección y Tratamiento de Sistemas GAM del AyA, cuenta con una propuesta preliminar de aumento de personal para la incorporación del tratamiento secundario mediante la tecnología de LAC (únicamente para etapa intermedia), en la cual se plantea un total de 15 puestos adicionales, clasificados en: 8 operadores, 6 técnicos y 1 jefe de turno. Para la incorporación de la etapa II en este TFG se estima se requerirán 3 funcionarios adicionales (2 operadores y 1 técnico especialista).

El costo anual por salarios del personal de O&M, del tratamiento secundario mediante la tecnología LAC, tanto de la etapa intermedia como la etapa II, se calculó con la versión más actualizada del Manual Descriptivo de Clases Institucionales del AyA (mayo del 2016) y el Índice Salarial (I semestre del 2017), información que se detalla en el Cuadro 89.

Cuadro 89. Costos del personal requerido para la O&M del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de LAC (etapa intermedia y II)

Etapas del proyecto	Descripción	Cantidad	Salario base mensual (según AyA)		Peligrosidad (10% del salario)	Cargas sociales (36,5% del salario)	Salario total mensual	Total salarios anual
			(₡)	(US\$)	(US\$)	(US\$)	(US\$)	(miles US\$)
Etapa intermedia	Operador (a)	8	277.550,0	486,85	48,69	195,47	731,01	70,18
	Técnico (b)	6	381.400,0	669,02	66,90	268,61	1.004,53	72,33
	Jefe Técnico (c)	1	456.100,0	800,05	80,00	321,22	1.201,27	14,42
	Subtotal: costos por personal etapa intermedia							156,92
Etapa II	Operador (a)	2	277.550,00	486,85	48,69	195,47	731,01	17,54
	Técnico Especialista (d)	1	416.300,00	730,24	73,02	293,19	1.096,45	13,16
	Subtotal: equipamiento etapa II							30,70
Notas: Tipo de cambio: ₡570,09/US\$ (promedio de los tipos de cambio del 01/01/2017 al 01/07/2017). El personal indicado según el tipo de puesto es: (a) Oficial General Sistemas de Aguas, (b) Técnico Sistemas de Aguas Residuales, (c) Jefe Técnico Sistemas de Aguas Residuales y (d) Técnico Especialista Sistemas de Aguas Residuales (datos obtenidos del Índice Salarial - I semestre 2017, Dirección de Capital Humano, AyA).								

Fuente: AyA, 2016b y 2017a.

6.3.2.3. Costos de las sustancias químicas requeridas

La implementación de la tecnología de LAC, específicamente la línea de aguas del tratamiento secundario, no requiere el consumo de sustancias químicas como parte obligatoria y fundamental de la operación del sistema.

6.3.2.4. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento

Debido a que los equipos mecánicos de la propuesta de Acciona Agua S.A.U. no fueron cotizados, se utilizó el monto estimado para este componente en el desglose de los costos de inversión del rubro “mecánica” (Cuadro 74). Se consideró dentro de este rubro los siguientes costos: adquisición del equipo, su instalación y tuberías locales. Los equipos que incluye este rubro son:

- equipos principales de tratamiento secundario: sopladores, rasquetas barrelados (de sedimentadores secundarios), bombas de recirculación y purga de lodos.
- equipos complementarios: bombas de vaciado, bomba de achique y desagüe de cámaras, entre otros pequeños equipos mecánicos.

Al contarse con un monto global de la propuesta de Acciona Agua S.A.U., al rubro de “mecánica” se le reduce un 20% por concepto de instalación y tuberías locales, esto para tener un aproximado del costo -exclusivo- de la adquisición del equipo.

El Cuadro 90 muestra el resultado de la estimación de los costos de mantenimiento de los equipos mecánicos, tanto los rutinarios anuales “mantenimiento 1” (1,5% del costo del equipo) como el “mantenimiento 2” el cual es más complejo y se realiza cada 5 años (5% del costo del equipo).

Cuadro 90. Costos de mantenimiento del equipo estimados para la tecnología LAC (etapa intermedia y II)

Tipo de mantenimiento	Porcentaje del costo del equipo y periodicidad	Costo (miles US\$)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Mantenimiento 1	1,5% (anual)	62,76	25,08	87,85
Mantenimiento 2	5% (cada 5 años)	209,21	83,61	292,83

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

6.3.2.5. Resumen de los costos de O&M para la tecnología de LAC

El Cuadro 91 resume todos los costos de O&M del tratamiento secundario para la implementación de la tecnología LAC en la PTAR Los Tajos.

Cuadro 91. Costos de O&M estimados para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de LAC (etapa intermedia y II)

Rubros de los costos de O&M	Período de aplicación del costo	Costo (miles US\$)		
		Etapla intermedia	Etapla II	Etapla intermedia + etapa II
Consumo energético	Anual	1.257,40	802,37	2.059,76
Personal	Anual	156,92	30,70	187,62
Mantenimiento 1	Anual	62,76	25,08	87,85
Mantenimiento 2	Cada 5 años	209,21	83,61	292,83

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

Al normalizar los costos de O&M anteriores a una misma unidad temporal (anual), se obtienen los costos y los porcentajes correspondiente a cada rubro analizado, tanto para la etapa intermedia, como la etapa II (Cuadro 92).

Cuadro 92. Distribución de los costos de O&M de la tecnología LAC normalizados anuales con los porcentajes correspondientes (etapa intermedia y II)

Rubros de los costos de O&M	Etapla intermedia		Etapla II		Etapla intermedia + etapa II	
	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)
Consumo energético	1.257,40	82,8	802,37	91,7	2.059,76	86,0
Personal	156,92	10,3	30,70	3,5	187,62	7,8
Mantenimiento 1	62,76	4,1	25,08	2,9	87,85	3,7
Mantenimiento 2	41,84	2,8	16,72	1,9	58,57	2,4
TOTAL	1.518,92	100	874,87	100	2.393,80	100

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010.

Como se observa en el Cuadro 92, los costos fijos anuales por O&M estarían cerca de US\$1,52 millones (etapa intermedia) y de US\$2,39 millones (al incorporar la etapa II). El consumo energético es el responsable del 86% de estos costos.

La estimación de los costos totales de O&M de la PTAR completa, deben considerar, además de los indicados en el Cuadro 92, los costos del consumo energético de todas las unidades del pretratamiento, tratamiento primario, línea de lodos y de olores; los costos por salarios del personal total de la PTAR; los mantenimientos de la totalidad de equipos en la PTAR, y la disposición y el transporte de los sólidos generados en todas las unidades de tratamiento. Este último costo no fue considerado en este TFG.

El costo anual para O&M de un sistema de tratamiento completo mediante LAC, se estima entre 4,0 y 8,0 US\$/hab-año (Sperling, 2007a). Al suponer el menor valor del rango para la PTAR Los Tajos de 4,0 US\$/hab-año, teóricamente se tendría un costo anual de O&M de US\$4,28 millones para la etapa intermedia, y de US\$6,48 millones al incorporar la etapa II. Este costo incluye pretratamiento,

tratamiento primario, secundario, desinfección y tratamiento completo de lodos.

Tsagarakis et al. (2001) indica que los costos de O&M varían mucho, dependiendo del tamaño y la capacidad del sistema. Un estudio realizado con PTARs de diferentes tamaños, todas con una capacidad mayor a 100.000 p.e, con la misma tecnología de LAC, determinó un costo anual de US\$3,3/p.e.·año. Al aplicar este valor para la PTAR Los Tajos, la cual tendría una población equivalente⁷ de 1.213.920 p.e. (etapa intermedia) y 1.840.320 p.e. (etapa II), se tendría un costo de O&M de US\$4,01 millones y US\$6,07 millones, respectivamente. Nuevamente en estos valores se consideran todas las unidades de tratamiento de una PTAR.

No se encontraron costos de O&M exclusivos para las unidades de tratamiento secundario, en la literatura consultada; sin embargo, al comparar los resultados obtenidos (Cuadro 92) con los indicados en las referencias de PTARs completas, los datos están razonables, aunque por la gran magnitud de este proyecto y las economías de escala, los costos de O&M de la PTAR completa, podrían ser menores por persona equivalente.

6.3.3. Costos de O&M estimados para la tecnología IFAS

6.3.3.1. Costos por consumo de energía

Similar al análisis realizado para la tecnología de LAC, para obtener el costo por consumo energético del tratamiento secundario de la tecnología IFAS, se seleccionan los costos unitarios de la Tarifa T-MT Media Tensión. Los resultados de costos por consumo total de energía (kWh/año) se muestran en el Cuadro 93, tanto para la etapa intermedia, como para la incorporación de la etapa II.

Cuadro 93. Costo por el consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos por medio de la tecnología de IFAS (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Costos anuales por consumo energético (miles US\$/año)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
IFAS	1.907,11	957,32	2.864,43

Fuente: ICE, 2017.

6.3.3.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)

Las actividades de O&M de la tecnología IFAS son muy similares a las de la tecnología LAC, pero requieren una complejidad técnica un poco mayor (Ordoñez, 2016). El personal a contratar debe contar

⁷ La población equivalente del proyecto en ambas etapas, se calculó con un DBO₅ por persona equivalente de **54 g/hab-d** (Bentem et al., 2007).

con un nivel más alto de capacitación, preferiblemente con experiencia en la operación de sistemas LAC. Se consideró la misma cantidad de 15 puestos adicionales (para la etapa intermedia) y 3 puestos adicionales (para la etapa II), pero con más capacitación y experiencia. El Cuadro 94 muestra los puestos seleccionados según la última versión del Manual Descriptivo de Clases Institucionales del AyA (AyA, 2016b) y el Índice Salarial (AyA, 2017a).

Cuadro 94. Costos del personal requerido para la O&M del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)

Etapas del proyecto	Descripción	Cantidad	Salario base mensual (según AyA)		Peligrosidad (10% del salario)	Cargas sociales (36,5% salario)	Salario total mensual	Total salarios anual
			(C)	(US\$)	(US\$)	(US\$)	(US\$)	(miles US\$)
Etapa inter-media	Operador (a)	4	277.550,0	486,9	48,7	195,5	731,0	35,09
	Técnico (b)	4	381.400,0	669,0	66,9	268,6	1.004,5	48,22
	Técnico Especialista (c)	6	416.300,0	730,2	73,0	293,2	1.096,4	78,94
	Jefe Técnico (d)	1	456.100,0	800,0	80,0	321,2	1.201,3	14,42
	Subtotal: costos por personal etapa intermedia							176,67
Etapa II	Técnico (b)	2	381.400,0	669,0	66,9	268,6	1.004,5	24,11
	Técnico Especialista (c)	1	416.300,0	730,2	73,0	293,2	1.096,4	13,16
	Subtotal: equipamiento etapa II							37,27
Notas: Tipo de cambio: ₡570,09/US\$ (promedio de los tipos de cambio del 01/01/2017 al 01/07/2017). El personal indicado según el tipo de puesto es: (a) Oficial General Sistemas de Aguas, (b) Técnico Sistemas de Aguas Residuales, (c) Técnico Especialista Sistemas de Aguas Residuales y (d) Jefe Técnico Sistemas de Aguas Residuales (datos obtenidos del Índice Salarial - I semestre 2017, Dirección de Capital Humano, AyA).								

Fuente: AyA, 2016b y 2017a.

6.3.3.3. Costos de las sustancias químicas requeridas

Implementar la tecnología de IFAS no requiere obligatoriamente el consumo de sustancias químicas en el tratamiento secundario (línea de aguas), por lo que este rubro no será considerado dentro de los costos de la implementación de esta tecnología.

6.3.3.4. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento

Se cotizaron los equipos principales del tratamiento secundario necesarios para la implementación de la tecnología IFAS, según los requerimientos del prediseño (sopladores, bombas y rasquetas barrelados). Además, se estimó un 15% adicional por equipo menor y un 22% por instalación. El dato final del equipamiento se muestra en el rubro de “mecánica” del Cuadro 80 (US\$5,633 millones). A este rubro se le excluye el porcentaje por instalación, teniendo el monto total de equipo (US\$4,39 millones).

Conociendo el costo total de la adquisición de los equipos, es posible estimar los costos del

mantenimiento preventivo y correctivo, aplicándoles los mismos porcentajes de la tecnología LAC, seleccionados por criterio técnico: 1,5% anual correspondiente a las actividades menores (mantenimiento 1), y 5% cada 5 años para las obras más complejas (mantenimiento 2). El Cuadro 95 resume la información de este rubro.

Cuadro 95. Costos de mantenimiento del equipo estimados para la tecnología IFAS (etapa intermedia y II)

Tipo de mantenimiento	Porcentaje del costo del equipo y periodicidad	Costo (miles US\$)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Mantenimiento 1	1,5% (anual)	65,91	28,90	94,81
Mantenimiento 2	5% (cada 5 años)	219,71	96,32	316,03

Fuente: Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015.

6.3.3.5. Costos del reemplazo de los biosoportes

La vida útil de los biosoportes es de 20 años (Angappan, 2014), cantidad de años que coincide con el período del análisis financiero de cada etapa del proyecto. El costo del reemplazo del volumen total de los biosoportes se estima se debe realizar en el año 21° de estar en operación la etapa intermedia (año 2040), y en el año 21° de estar operando la etapa II (año 2046). El Cuadro 96 indica el volumen de biosoportes requeridos por cada etapa.

Cuadro 96. Volúmenes necesarios de biosoportes para cada etapa del proyecto.

Etapa	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Volumen de biosoportes (m³)	5.040	2.240	7.280

Fuente: Headworks Bio Inc., 2016.

El costo unitario de los biosoportes está estimado en US\$691,05/m³ de material (sin I.V.), se le debe agregar el impuesto de ventas (13%), impuesto de la Ley N°6946 (1%), flete internacional a Costa Rica (8%), transporte a la PTAR (aprox. 5%) para un total del 27% por nacionalización. Al incluirle estos costos adicionales, el costo por unidad de volumen de las celdas plásticas sería de US\$877,64/m³ (con impuestos y colocado en sitio).

Además del reemplazo completo de los biosoportes, durante su vida útil se podrían presentar imprevistos de pérdida o deterioro del material, por lo que se supondrá una pérdida del 15% del volumen de los biosoportes, aplicados a la mitad de su vida útil, que corresponde al año diez de operación. El Cuadro 97 resume los resultados del cálculo para reemplazo de biosoportes, tanto por vida útil como por imprevistos.

Cuadro 97. Cálculo de los costos por reemplazo de los biosoportos para la tecnología IFAS (etapa intermedia y II)

Tipo y plazo del reemplazo	Porcentaje de reemplazo de los biosoportos	Costo (miles US\$)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Por imprevistos: cada 10 años	Reemplazo 15%	663,49	294,89	958,38
Por vida útil: cada 20 años	Reemplazo 100%	4.423,28	1.965,90	6.389,18

Fuente: Headworks Bio Inc., 2016.

6.3.3.6. Resumen de los costos de O&M para la tecnología IFAS

El Cuadro 98 resume todos los costos de O&M para la implementación de la tecnología IFAS como tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos, donde se detallan los costos por mantenimiento anual, mantenimiento periódico cada 5 años, y los reemplazos de biosoportos cada 10 y 20 años.

Cuadro 98. Costos de O&M estimados para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de IFAS (etapa intermedia y II)

Rubros de los costos de O&M	Período de aplicación del costo	Costo (miles US\$)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Consumo energético	Anual	1.907,11	957,32	2.864,43
Personal	Anual	176,67	37,27	213,93
Mantenimiento 1	Anual	65,91	28,90	94,81
Mantenimiento 2	Cada 5 años	219,71	96,32	316,03
Reemplazo 15%	Cada 10 años	663,49	294,89	958,38
Reemplazo 100%	Cada 20 años	4.423,28	1.965,90	6.389,18

Fuente: Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015; Headworks Bio Inc., 2016; ICE, 2017 y AyA, 2016b y 2017a.

Los costos con diferente unidad temporal (no anual) se normalizan a un año, obteniéndose los resultados que se muestran en el Cuadro 99.

Cuadro 99. Distribución de costos de O&M de la tecnología IFAS normalizados anuales con los porcentajes correspondientes (etapa intermedia y II)

Rubros de los costos de O&M	Etapa intermedia		Etapa II		Etapa intermedia + etapa II	
	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)
Consumo energético	1.907,11	76,9	957,32	81,8	2.864,43	78,4
Personal	176,67	7,1	37,27	3,2	213,93	5,9
Mantenimiento 1	65,91	2,7	28,90	2,5	94,81	2,6
Mantenimiento 2	43,94	1,8	19,26	1,6	63,21	1,7
Reemplazo 15% biosoportos	66,35	2,7	29,49	2,5	95,84	2,6
Reemplazo 100% biosoportos	221,16	8,9	98,30	8,4	319,46	8,7
TOTAL	2.481,14	100	1.170,53	100	3.651,67	100

Fuente: Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015; Headworks Bio Inc., 2016; ICE, 2017 y AyA, 2016b y 2017a.

Similar a la tecnología de LAC, para la tecnología de IFAS el costo por consumo energético es el más importante de los costos de O&M; sin embargo, el reemplazo por la vida útil de los biosoportos (cada 20 años) agrega un costo adicional medianamente importante, y los costos por compra de biosoportos por imprevistos (cada 10 años) también agregan una diferencia leve, por lo que se distribuyen todos los costos de O&M.

6.3.4. Costos de O&M estimados para la tecnología MBR

6.3.4.1. Costos por consumo de energía

Similar a las dos tecnologías anteriores, los costos por consumo energético se obtienen a partir de los datos de potencia consumida y las horas de operación del equipo, utilizando la tarifa T-MT de la CNFL (presentada anteriormente en el Cuadro 87). Los resultados de estas estimaciones para ambas etapas se muestran en el Cuadro 100 a continuación:

Cuadro 100. Costo del consumo energético anual para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos por medio de la tecnología de MBR (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Costos anuales por consumo energético (miles US\$/año)		
	Etapla intermedia	Etapla II	Etapla intermedia + etapa II
MBR	2.404,07	1.269,87	3.673,94

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b; ICE, 2017.

6.3.4.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)

Algunas de las actividades operativas a realizar en un sistema MBR son similares a las de un sistema LAC o IFAS, específicamente las que les atañen a los tanques de tratamiento biológico. Otras actividades son muy diferentes a las de un sistema convencional, específicamente en los tanques de membranas y con respecto al control, automatización y monitoreo de todos los procesos; por lo que se requiere personal muy capacitado y especializado en muchas disciplinas: ingeniería eléctrica, mecánica, electrónica, telemática, informática, química, civil y sanitaria.

Se propone para la tecnología de MBR la misma cantidad de personal que en las tecnologías de LAC e IFAS (en la etapa intermedia), pero con un nivel de especialización mayor. Se requerirán 15 puestos adicionales -incluidos 2 puestos de profesionales- y se proponen 4 puestos adicionales para la etapa II. El Cuadro 101 muestra los cálculos de costos por salarios, según los puestos seleccionados del Manual Descriptivo de Clases Institucionales del AyA (AyA, 2016b) y el Índice Salarial (AyA, 2017a).

Cuadro 101. Costos del personal requerido para la O&M del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y II)

Etapas del proyecto	Descripción	Cantidad	Salario base mensual (según AyA)		Peligrosidad (10% del salario)	Cargas sociales (36,5% salario)	Salario total mensual	Total salarios anual
			(₡)	(US\$)	(US\$)	(US\$)	(US\$)	(miles US\$)
Etapa inter-media	Técnicos (a)	4	381.400,0	669,0	66,9	268,6	1.004,5	48,22
	Técnico Especialista (b)	7	416.300,0	730,2	73,0	293,2	1.096,4	92,10
	Jefe Técnico (c)	2	456.100,0	800,0	80,0	321,2	1.201,3	28,83
	Profesional Ing. Electrónica (d)	1	731.750,0	1.283,6	128,4	515,4	1.927,3	23,13
	Profesional en Saneamiento (e)	1	936.000,0	1.641,8	164,2	659,2	2.465,2	29,58
	Subtotal: costos por personal etapa intermedia							221,86
Etapa II	Técnicos (a)	2	381.400,0	669,0	66,9	268,6	1.004,5	24,11
	Técnico Especialista (b)	2	416.300,0	730,2	73,0	293,2	1.096,4	26,31
	Subtotal: equipamiento etapa II							50,42
Notas: Tipo de cambio: ₡570,09/US\$ (promedio de los tipos de cambio del 01/01/2017 al 01/07/2017). El personal indicado según el tipo de puesto es: (a) Técnico Sistemas de Aguas Residuales, (b) Jefe Técnico Sistemas de Aguas Residuales (jefes técnicos en las áreas de electromecánica y electrónica), (c) Técnico Especialista Sistemas de Aguas Residuales (equipo multidisciplinario en las áreas de: ingeniería eléctrica, mecánica, electrónica, telemática, informática, química, civil), (d) Ejecutivo Avanzado Sistemas de Agua (profesional con licenciatura en Ingeniería Electrónica), (e) Ejecutivo Experto Sistemas de Aguas (profesional con Maestría en Ingeniería Sanitaria). (Datos obtenidos del Índice Salarial - I semestre 2017, Dirección de Capital Humano, AyA).								

Fuente: AyA, 2016b y 2017a.

6.3.4.3. Costos de las sustancias químicas requeridas

La implementación de la tecnología de MBR requiere utilizar varias sustancias químicas, especialmente para las actividades de limpieza de las membranas. La empresa Evoqua aportó un estimado del consumo de sustancias químicas, según la frecuencia aproximada de los ciclos de limpieza de las membranas para el prediseño de la PTAR Los Tajos (Evoqua, 2016d).

Se realizó una cotización con la empresa nacional SERQUIMSA para la compra de las sustancias químicas indicadas por Evoqua (Anexo B-3), y a partir de las cantidades requeridas al año y sus concentraciones, se obtuvo el costo total por consumo de sustancias químicas (marzo del 2016) valores que se trajeron a enero del 2017 por medio del Índice de Precios al Productor de la Manufactura por Producto (CCP) del BCCR, para el componente de: “otros productos químicos”, resultado que se muestra en el Cuadro 102 (BCCR, 2017d).

Cuadro 102. Costo por consumo de sustancias químicas (etapa intermedia y etapa II)

Etapa de proyecto	Reactivo químico	Cantidad requerida (kg/año)	Costo total con IVI* (US\$/kg)	Costo total anual (miles US\$)
Etapa intermedia	Hipoclorito de sodio (al 12%)	170.081,80	0,46	78,80
	Ácido Cítrico (al 99,9%) **	19.234,68	1,65	31,73
	Ácido Sulfúrico (al 70%)	3.416,00	1,01	3,44
	TOTAL			113,97
Etapa intermedia + etapa II	Hipoclorito de sodio (al 12%)	255.122,70	0,46	118,20
	Ácido cítrico (al 99,9%) **	28.852,02	1,65	47,60
	Ácido sulfúrico (al 70%)	5.124,00	1,01	5,15
	TOTAL			170,95
Notas: *: Costo total con IVI incluye el transporte y la descarga en el sitio. **: El costo del ácido cítrico se obtuvo a partir de un estimado del consumo anual de este químico al 99,9% (opción del mercado).				

Fuente: Evoqua 2016d, SERQUIMSA 2016.

6.3.4.4. Costos del mantenimiento preventivo y correctivo del equipamiento

Los costos por la adquisición del equipo del sistema MBR, fueron cotizados en el “paquete membranas”, por parte de la empresa Evoqua, quienes proveen todo el equipamiento requerido para el sistema, esto incluye: sopladores del sistema biológico, bombas para filtrado del sistema de membranas, bombas para alimentación de los tanques de membranas, sopladores para el sistema de membranas y compresores de aire auxiliares.

Además, se cotizó a una empresa internacional el equipo de pretratamiento adicional al existente, de tipo tamiz rotativo (rototamiz), que debe ubicarse previo al sistema de MBR, para cumplir con los requerimientos indicados por Evoqua de tamaño de partícula mínima en el licor de mezcla a ser filtrado (perforación menor a 1,5 mm).

Al utilizar el desglose de costos de inversión de la tecnología de MBR (Cuadro 85) para el rubro de “mecánica”, se estimó un costo total por equipo de US\$10,26 millones para la etapa intermedia y de US\$4,85 millones para la etapa II. Los costos únicamente por la adquisición del equipo se obtuvieron excluyendo el porcentaje por su instalación (estimado en 20%), resultando en US\$8,21 millones para la etapa intermedia y de US\$3,88 millones para la etapa II.

Similar a la estimación de costos de mantenimiento de equipo realizada para las tecnologías de LAC e IFAS, los porcentajes del costo del equipo seleccionados por criterio técnico corresponden a: 1,5% anual por las actividades menores (mantenimiento 1), y 5% cada 5 años para las obras más complejas (mantenimiento 2). El Cuadro 103 resume los resultados referentes a los costos de mantenimiento de equipo para la tecnología MBR.

Cuadro 103. Costos de mantenimiento del equipo estimados para la tecnología MBR (etapa intermedia y II)

Tipo de mantenimiento	Porcentaje del costo del equipo y periodicidad	Costo (miles US\$)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Mantenimiento 1	1,5% (anual)	123,16	58,16	181,32
Mantenimiento 2	5% (cada 5 años)	410,53	193,87	604,39

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

6.3.4.5. Costo por reemplazo de las membranas

Uno de los costos más importantes a lo largo de la vida útil de un sistema MBR es el reemplazo de las membranas. Como se indicó en la sección 2.4.8.6, la vida útil de las membranas es muy variable. Se consideró una vida útil de 10 años para el tipo de membrana propuesto para la PTAR Los Tajos, por sugerencia técnica de la empresa Evoqua (Zamarro, 2016).

El costo por reemplazo de membranas en un sistema de gran escala suele estar entre US\$1.000 y US\$1.200 por módulo de membranas (Zamarro, 2016). En este caso, se asumirá un costo intermedio de US\$1.100/módulo. El Cuadro 104 muestra los resultados del costo por reemplazo de membranas (cada diez años) según la cantidad de módulos en cada etapa.

Cuadro 104. Costos estimados por reemplazo de membranas de la tecnología MBR (etapa intermedia y II)

Características del sistema MBR	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Cantidad de módulos/tanque	992	992	992
Cantidad de tanques	12	6	18
Cantidad total de módulos	11.904	5.952	17.856
Costos reemplazo de membranas (miles US\$)	16.629,89	8.314,94	24.944,83

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

6.3.4.6. Resumen de costos de O&M para la tecnología MBR

El Cuadro 105 resume todos los costos de O&M del tratamiento secundario para la implementación de la tecnología MBR en la PTAR Los Tajos. Se detallan los costos por mantenimiento anual, mantenimiento cada 5 años, y los reemplazos de membranas cada 10 años.

Cuadro 105. Costos de O&M estimados para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de MBR (etapa intermedia y II)

Rubros de los costos de O&M	Período de aplicación del costo	Costo (miles US\$)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + II
Consumo energético	Anual	2.404,07	1.269,87	3.673,94
Personal	Anual	221,86	50,42	272,28
Productos químicos	Anual	113,97	56,98	170,95
Mantenimiento 1	Anual	123,16	58,16	181,32
Mantenimiento 2	Cada 5 años	410,53	193,87	604,39
Reemplazo de membranas	Cada 10 años	16.629,89	8.314,94	24.944,83

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

Al normalizar los costos de O&M anteriores a una misma unidad temporal (costos anuales), se obtienen los resultados del Cuadro 106, donde también se detallan los porcentajes correspondiente a cada rubro.

Cuadro 106. Distribución de los costos de O&M de la tecnología MBR normalizados anuales con los porcentajes correspondientes (etapa intermedia y II)

Rubros de los costos de O&M	Etapa intermedia		Etapa II		Etapa intermedia + etapa II	
	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)	Costo (miles US\$)	Porcentaje por rubro (%)
Consumo energético	2.404,07	52,2	1.269,87	55,1	3.673,94	53,1
Personal	221,86	4,8	50,42	2,2	272,28	3,9
Productos químicos	113,97	2,5	56,98	2,5	170,95	2,5
Mantenimiento 1	123,16	2,7	58,16	2,5	181,32	2,6
Mantenimiento 2	82,11	1,8	38,77	1,7	120,88	1,7
Reemplazo de membranas	1.662,99	36,1	831,49	36,1	2.494,48	36,1
TOTAL	4.608,15	100	2.305,70	100,0	6.913,86	100

Fuente: Evoqua, 2016a y 2016b.

Como se evidencia en el Cuadro 106, el costo correspondiente al consumo energético, así como el reemplazo de las membranas son los más representativos para esta tecnología. Lo anterior refuerza lo indicado en Hai et al. “el costo por reemplazo de las membranas es un costo crítico para esta tecnología” (2014). Estudios han demostrado que, con el paso de los años, los costos de implementar esta tecnología, tanto de inversión como de O&M, se encuentra disminuyendo, principalmente debido al abaratamiento de las membranas (avances en su fabricación), a la mejora en el conocimiento del sistema y al aumento de la competencia entre las empresas proveedoras en el mercado (DeCarolís et al., 2007).

6.3.5. Comparación de los costos de Operación y Mantenimiento (O&M) de las tecnologías estudiadas LAC, IFAS y MBR

3.5.1. Costos por consumo de energía

Al comparar los costos por consumo energético de las tres tecnologías estudiadas (Cuadro 107), como es de esperarse, la tecnología MBR es la que requiere mayor gasto en consumo energético, la cual a pesar de contar con equipos eficientes (sopladores integrados al sistema *Mempulse*™) otros de sus equipos consumen mucha energía para su operación.

Cuadro 107. Costos anuales del consumo energético por cada tecnología de tratamiento secundario analizada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Costos por consumo energético (miles US\$/año)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + II
LAC	1.257,40	802,37	2.059,76
IFAS	1.907,11	957,32	2.864,43
MBR	2.404,07	1.269,87	3.673,94

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010; Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015 y 2016; Evoqua, 2016c e ICE, 2017.

3.5.2. Costo del personal para la operación y el mantenimiento (O&M)

La cantidad de personal de O&M requerido para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos, es muy similar para las tres tecnologías; sin embargo, los perfiles requeridos son muy diferentes. Dependiendo del nivel tecnológico de cada sistema, se necesitarán mayores niveles de capacitación, experiencia y conocimiento, variando con esto el perfil del personal y el monto de salario. El escalamiento de menor a mayor costo por salarios del personal, inician con la tecnología de LAC, seguido de IFAS y finalmente MBR (Cuadro 108).

Cuadro 108. Costos anuales por salarios de personal para cada tecnología de tratamiento secundario estudiada para la PTAR Los Tajos (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Costos por salarios del personal (miles US\$/año)		
	Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + II
LAC	156,92	30,70	187,62
IFAS	176,67	37,27	213,93
MBR	221,86	50,42	272,28

Fuente: AyA, 2016b y 2017a.

3.5.3. Costos de las sustancias químicas requeridas

La tecnología de MBR es la única que requiere, como parte de la línea de tratamiento de aguas, el uso obligatorio de sustancias químicas. El costo anual por la adquisición de los productos químicos es de US\$113,97 miles para la etapa intermedia y una vez implementada la etapa II de US\$170,95 miles.

3.5.4. Costos del mantenimiento del equipo

Los costos del mantenimiento del equipo son proporcionales al costo de la adquisición de los mismos, por lo que tienen un comportamiento similar. El Cuadro 109 resume los costos correspondientes al mantenimiento 1 y al mantenimiento 2 para las tres tecnologías de tratamiento analizadas.

Cuadro 109. Costos estimados por el mantenimiento del equipo para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos para las tres tecnologías estudiadas (etapa intermedia y etapa II)

Tipo de mantenimiento	Tecnología	Costos (miles US\$/año)		
		Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
Mantenimiento 1	LAC	62,76	25,08	87,85
	IFAS	65,91	28,90	94,81
	MBR	123,16	58,16	181,32
Mantenimiento 2	LAC	209,21	83,61	292,83
	IFAS	219,71	96,32	316,03
	MBR	410,53	193,87	604,39

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010; Gardner Denver, 2016a y 2016b; Hidrotica, 2016; PAM, 2015 y 2016; Evoqua, 2016a y 2016b.

Como se puede observar en el Cuadro 109, si comparamos los costos por el mantenimiento de equipo entre las tecnologías LAC e IFAS, éstos no distan más del 4,8% para la etapa intermedia y 13,2% para la etapa II. Por el contrario, los costos de mantenimiento de la tecnología de MBR, se alejan mucho de los de las otras dos tecnologías: 49% (etapa intermedia) y 57% (etapa II) mayores que la tecnología LAC, y 46% (etapa intermedia) y 50% (etapa II) mayor que el costo de mantenimiento de la tecnología IFAS.

3.5.5. Costo por reemplazo de insumos específicos (biosoportes y membranas)

El siguiente cuadro muestra los costos y períodos de reemplazo de los biosoportes (para el caso de la tecnología IFAS) y de las membranas (para la tecnología MBR).

Cuadro 110. Costos asociados al reemplazo de insumos (biosoportes y membranas) según el tipo de tecnología IFAS o MBR (etapa intermedia y etapa II)

Tecnología	Tipo de reemplazo	Período de reemplazo	Costos (miles US\$/año)		
			Etapa intermedia	Etapa II	Etapa intermedia + etapa II
IFAS	Reemplazo de biosoportes por imprevistos	Cada 10 años	663,49	294,89	958,38
	Reemplazo de biosoportes por vida útil	Cada 20 años	4.423,28	1.965,90	6.389,18
MBR	Reemplazo de membranas por vida útil	Cada 10 años	16.629,89	8.314,94	24.944,83

Fuente: Angappan, 2014 y Zamorro, 2016.

Los insumos reemplazables de las tecnologías IFAS y MBR no son comparables, pues los insumos son muy diferentes entre sí, específicos para cumplir diferentes funciones en la tecnología respectiva. Los biosoportes son celdas de plástico virgen, de diseño específico, pero de fabricación en serie y fácil instalación; mientras que los equipos de membranas son un conjunto de componentes de diferentes materiales con características de fabricación muy diferentes, los cuales requieren procesos industriales y manuales para su composición, además de una singular instalación. Debido a estas claras diferencias, se puede observar en el Cuadro 110, que los costos por el reemplazo de membranas son muy significativos, siendo entre 25 y 28 veces más costosos que la sustitución de biosoportes para la tecnología de IFAS cada 10 años. Esta gran diferencia en costos se verá reflejada en el análisis financiero de la sección 6.5.

6.4. Canon ambiental por vertido

El Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos y sus reformas, Decreto Ejecutivo N° 34431-MINAE-S (publicado en la Gaceta N° 74 del 17 de abril del 2008), define el canon como un instrumento económico de regulación ambiental, que se fundamenta en el principio de quien contamina paga y que pretende el objetivo social de alcanzar un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, de conformidad con lo establecido en el artículo 50 de la Constitución Política. Es la contraprestación en dinero pagada por quienes usen el servicio ambiental de los cuerpos de agua, para el transporte y eliminación de desechos líquidos originados en el vertimiento puntual.

Dicho reglamento indica que el canon se cobrará sobre la carga contaminante neta vertida, medida en kilogramos, de dos parámetros de contaminación: “Demanda Química de Oxígeno (soluble) DQO(s)” y “Sólidos Suspendidos Totales SST”.

Se consideró, para las tres tecnologías, que el efluente vertido siempre cumplirá con los límites del RVRAR, por lo que para el cálculo se aplicará lo indicado en el Artículo 24 de dicho Reglamento, utilizando la siguiente ecuación:

$$Monto_j = \frac{Q * 0,0864 * \frac{t}{24} * Cn_j * M_j * T * P * 0,75}{4} \quad [Ec. 56]$$

Donde:

Monto_j: monto trimestral de SST o DQO(s) (US\$)

Q: caudal promedio vertido (l/s)

0,0864: factor de conversión de unidades

t: tiempo promedio de vertido diario (h)= 24 h

C_{nj}: concentración de vertido (mg/l)

M_j: monto del parámetro (\$/kg) [\$0,22/ kg de DQO(s) y \$0,19/ kg de SST].

T: período de descarga mensual (días)= 30 d

P: período de descarga anual (meses)=12 meses

0,75: factor de incentivo

Se opta por determinar la relación de DQO(t)/DQO(s) del agua cruda afluente a la PTAR Los Tajos, para determinar la DQO(s) a utilizar en la [Ec. 56] para todas las tecnologías. Dicha relación se obtuvo a partir del promedio de los resultados del Laboratorio de Aguas Residuales de la PTAR Los Tajos, presentados en los reportes operacionales de octubre del 2016, enero del 2017 y marzo del 2017. Los tres reportes operacionales utilizan los resultados de un muestreo compuesto de 24 horas (muestra integrada a partir de 24 submuestras de 1000 ml, recolectadas cada 60 min durante 24 horas consecutivas). El resultado de esta relación es de 2,388.

El Cuadro 111 indica los parámetros de contaminación aplicados para el cálculo del canon ambiental, a partir de las calidades esperadas del efluente de cada tecnología, y aplicando la relación de DQO(t)/DQO(s)= 2,388.

Cuadro 111. Calidad del efluente para ser evaluado en el canon ambiental por vertidos.

Tecnología	Parámetros de contaminación (mg/l)		
	SST	DQO(t)	DQO(s)
LAC	30	150	62,82
IFAS	30	125	52,35
MBR	5	50	20,94

Fuente: Acciona Agua S.A.U. 2010, Headworks Bio Inc. 2016, Evoqua 2016, AyA 2017.

Según la proyección del caudal estimada para las etapas del proyecto, y considerando que el caudal de entrada es igual al de vertido, para todas las tecnologías éste será de 2.810 l/s al inicio de la etapa intermedia (caudal supuesto al 2018) y de 4.260 l/s para la etapa II (supuesto constante desde el 2025 hasta el 2046). El caudal de ingreso a la PTAR irá aumentando conforme la red de recolección de aguas residuales sea construida, por lo que se estimará un crecimiento lineal del caudal entre el 2018 y el 2025, y a partir del 2025, se consideró el mismo caudal hasta el 2046 (año final del análisis). Lo anterior se representa gráficamente en la Figura 39.

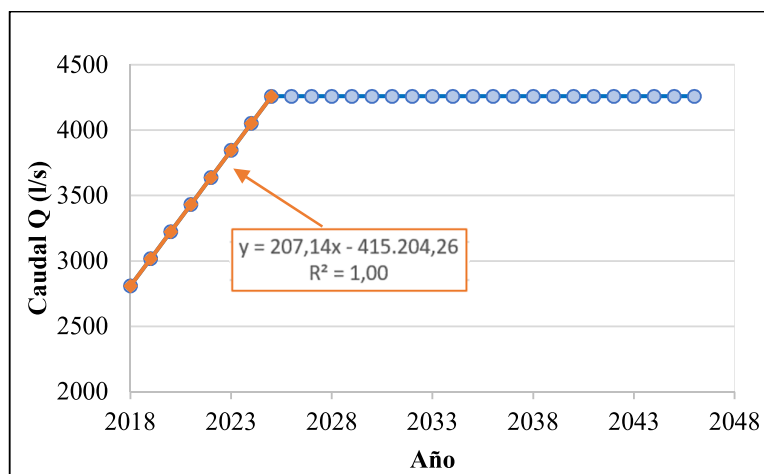


Figura 39. Proyección lineal del crecimiento del caudal entre el 2018 y el 2025 y caudal constante a partir del 2026 hasta el 2046.

Fuente: AyA, 2010 y estimaciones de la autora.

El análisis financiero de las tres tecnologías (desarrollado en la sección 6.5), calcula el costo del canon en el período de análisis, variando según la suposición del crecimiento del caudal indicada en la Figura 39. El Cuadro 112 indica los costos en miles de dólares anuales, correspondientes al canon ambiental por vertidos para los años de inicio y fin del análisis (2020 y 2046).

Cuadro 112. Costos del canon ambiental para el año de inicio de operación de la etapa intermedia (2020) y el final del período de análisis (2046)

Tecnología	Costo del canon (miles US\$/año)					
	Etapa intermedia (año 2020)			Etapa II (año 2046)		
	DQO(s)	SST	Total	DQO(s)	SST	Total
LAC	1.039,55	428,74	1.468,29	1.373,43	566,45	1.939,88
IFAS	866,29	214,37	1.080,66	1.144,53	283,23	1.427,75
MBR	346,52	71,46	417,97	457,81	94,41	552,22

Fuente: Decreto Ejecutivo N° 34431 MINAE-S y AyA, 2017.

6.5. Análisis financiero de las tecnologías LAC, IFAS y MBR

6.5.1. Método de análisis financiero: Valor Actual de Costos (VAC)

El análisis financiero en un proyecto se realiza para determinar su rentabilidad. Este TFG aplica el análisis financiero para evaluar cuál de las tres tecnologías es más rentable para ser ejecutada como tratamiento secundario en la PTAR Los Tajos.

El método a seleccionar para el análisis financiero es el Valor Actual de Costos (VAC), con el cual, es

posible trasladar y homogenizar todos los flujos de efectivo (costos) esperados de un proyecto en momentos de tiempo diferentes, a un mismo momento de tiempo ($t = 0$ al inicio). El VAC únicamente analiza los costos, mientras que el VAN analiza tanto los ingresos como los gastos (Mata, 2008).

Cuando se tienen diferentes alternativas para un mismo proyecto (siempre y cuando tengan vidas económicas iguales), se puede aplicar el VAC a cada alternativa y comparar los resultados, para determinar la más rentable entre las alternativas. Analizando este proyecto en específico, de las tres tecnologías estudiadas (LAC, IFAS y MBR), la que tenga el VAC más alto (menos negativo) será la más rentable, lo que va en concordancia con el criterio de maximizar el valor del proyecto (Ortegón et al., 2005).

El VAC resulta de aplicar la siguiente ecuación:

$$VAC = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad [\text{Ec. 57}]$$

Donde:

C_t : Costos en cada período t .

I_0 : Valor del desembolso inicial de la inversión (costo de inversión + costo del terreno).

n : número de períodos considerados (20 años para este caso, a partir de la etapa II).

i : tasa de interés (%).

Una de las dificultades para la obtención del VAC, es fijar el valor para la tasa de interés (o tasa de descuento). Al aplicar la misma tasa de interés para las tres tecnologías analizadas, se da una “homogenización” de los flujos. La tasa de interés elegida permitirá realizar el análisis indistintamente de cuál haya sido el criterio para fijarla.

6.5.2. Aspectos importantes para la aplicación del VAC

La aplicación del método VAC a todos los flujos de dinero determinados para las tecnologías de LAC, IFAS y MBR, consideró los siguientes aspectos:

- Únicamente se analizaron los gastos (costos), los cuales fueron obtenidos según los precios del mercado.

- Los ingresos a percibirse del proyecto se excluyeron del análisis, pues el medio de ingresos en este caso corresponde a las tarifas de cobro por el servicio de alcantarillado sanitario y tratamiento de las aguas residuales, tarifas que no son sencillas de cuantificar, pues dependen de muchas variables y análisis socioeconómicos (incluyendo la realización de encuestas de disposición a pagar) que están fuera del alcance de este TFG. Además, el presente análisis está delimitado por la incorporación del tratamiento secundario (etapa intermedia y etapa II) dentro del servicio completo, descartando los costos que incurren la recolección de las aguas residuales (red de alcantarillado sanitario) y lo que corresponde al pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento completo de lodos y tratamiento de olores (todos los anteriores incluidos desde la etapa I del proyecto).
- Los costos analizados se fraccionan en: (1) costos por adquisición del terreno y costos de inversión; y (2) costos de operación y mantenimiento (O&M) y costos por el canon ambiental por vertidos, los cuales fueron estimados en las secciones 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4, respectivamente.
- Los terrenos Tajo Norte y Tajo Sur ya fueron adquiridos (Tajo Sur se encuentra en proceso de compra) por parte del AyA. Debido a las diferencias en áreas de terreno de las tres tecnologías, se consideró el costo por la adquisición del terreno dentro del análisis financiero, en conjunto con los costos de inversión.
- El presente TFG analizó las dos etapas para la ampliación de la PTAR Los Tajos (planificadas en etapa intermedia y etapa II), por lo que se realizó un sólo escenario financiero compuesto por ambas etapas.
- Se consideraron dos años de construcción para la etapa intermedia y un año de construcción para la etapa II, pues las obras de infraestructura de esta segunda etapa son menores. Por lo tanto, la etapa intermedia entraría en operación a partir del 2020, mientras que la etapa II iniciaría operaciones hasta el 2026.
- Se consideró para la etapa intermedia que la inversión inició en el 2018, mientras que para la etapa II se consideró el inicio en el 2025 (año en que se proyecta la ampliación de caudal).
- El período de análisis (vida económica) del proyecto fue de 20 años posterior a la entrada en operación de la etapa II. Se estimó que la segunda etapa de la PTAR inicia operación a inicios del 2026, por lo que el análisis financiero se concluye a inicios del 2046.
- El costo por la adquisición del terreno se descontó al inicio de cada etapa (en el año cero respectivo), mientras que los costos de inversión inicial serán aplicados durante los años de construcción de cada etapa del proyecto. El costo de inversión inicial para la etapa intermedia, se

dividirá en dos debido a sus dos años de construcción (2018 y 2019), mientras que para la etapa II, todos los costos iniciales se aplicarán en el 2025.

- Los costos de adquisición de terreno para la etapa II y los costos de inversión inicial se consideraron invariables a los estimados en el 2017, aplicándose los mismos en el 2025.
- La tasa de interés ($i\%$) seleccionada para el análisis fue del 6% anual, la cual corresponde a la misma tasa de interés asignada para la evaluación financiera de la etapa I de la PTAR Los Tajos, indicada así en el cartel de la licitación LPI N°2008-0002-PRI del AyA.
- Los costos de la propuesta de LAC de Acciona Agua S.A.U. fueron presentados en la oferta de la Licitación LPI N°2008-0002-PRI en el 2010. Estos costos se proyectaron al presente (2017), utilizando el Índice de Precios al Productor Industrial -con combustible- (IPPI) del BCCR. Se calculó el promedio del IPPI-General de enero del 2010 a enero del 2017, dando como resultado un porcentaje de crecimiento del 2,88% anual. Este porcentaje de aumento se le aplicó al valor estimado del costo de inversión, a partir de la propuesta de Acciona Agua S.A.U. para la etapa intermedia y etapa II. Lo anterior fue desarrollado en la sección 6.2.2.2.
- Los costos por reemplazo de los biosoportres, tanto por imprevistos (15% del costo cada 10 años) como por llegar al final de su vida útil (100% del costo cada 20 años), se mantienen constantes a lo largo de todo el período de análisis.
- El consumo energético será considerado constante durante todo el periodo de análisis, según el consumo de energía calculado para cada etapa. Los costos referentes a la demanda energética aumentarán con el paso del tiempo, pues se les aplicó un porcentaje por inflación según el promedio de los últimos 5 años del Índice de Precios al Productor de Servicios (IPP-S) del BCCR, por servicio según la Clasificación Central de Productos (CCP) para el nivel 691: “Electricidad”, calculado desde enero del 2012 a enero del 2017, dando como resultado un 2,89% promedio anual (BCCR, 2017e). El cálculo corresponde a los últimos cinco años, pues este índice cambió de metodología con una base más reciente (2012 = 100).
- Se consideró una inflación del 5,02% anual aplicada en todos salarios del personal de las tres tecnologías analizadas. Esta suposición está basada en el análisis del Índice de Salarios Mínimos Nominales (ISMN) del BCCR, utilizando el promedio anual de los últimos 7 años (enero del 2010 a enero del 2017) (BCCR, 2017f).
- Se proyecta que la cantidad de sustancias químicas a utilizar para la operación de la tecnología MBR, son constantes durante la etapa intermedia y constantes durante la etapa II. El costo en ambas etapas aumenta anualmente según el promedio de los últimos 5 años del Índice de Precios

al Productor de la Manufactura (IPP-MAN) del BCCR, para la Clasificación Central de Productos (CCP), para el nivel 35: “Otros productos químicos”, calculado desde enero del 2012 a enero del 2017, dando como resultado un 2,10% promedio anual (BCCR, 2017d). El uso de este índice es una suposición, debido a que no se cuenta con un índice exclusivo para las sustancias químicas a utilizar. El cálculo corresponde a los últimos cinco años, pues este índice cambió de metodología con una base más reciente (2012 = 100).

- Se excluyen de este análisis los costos legales, sociales y otros, pues no forman parte de los alcances de este TFG. Los costos ambientales únicamente incluyen el costo por canon ambiental de vertidos, como metodología de valoración económica del impacto ambiental.
- El canon ambiental por vertidos se calculó según lo indicado en el Decreto Ejecutivo N°34431-MINAE-S. Se determinaron las calidades del agua efluente para cada tecnología y se fijaron constantes a lo largo del período de análisis. Únicamente se consideró la variación del caudal, aumentando linealmente desde el 2018 (caudal de la etapa intermedia) hasta el 2025 (caudal de la etapa II), y a partir del 2026 al 2046 se consideró un caudal constante igual al caudal de la etapa II. Lo anterior fue desarrollado en la sección 6.4.
- Este proyecto es una inversión pública y por su magnitud, se requiere de un financiamiento externo para poder ejecutarse.
- No se consideró el escudo fiscal por ser un proyecto de carácter estatal, lo que incluye tanto la depreciación como el impuesto sobre la renta.

6.5.3. Resultados del VAC

El análisis financiero se realizó siguiendo los aspectos mencionados en la sección 6.5.2 y a partir de las estimaciones de costos realizadas para cada tecnología de:

1. Costos de adquisición del terreno (sección 6.1)
2. Costos de inversión (sección 6.2)
3. Costos de O&M (sección 6.3)
4. Costos por el canon ambiental por vertidos (sección 6.4)

Las siguientes figuras presentan los diagramas de flujo seguidos de los cuadros de cálculo con los flujos de caja, correspondientes al análisis del VAC para cada tecnología.

1. Diagrama de Flujo del VAC: Lodos Activados Convencionales (LAC)

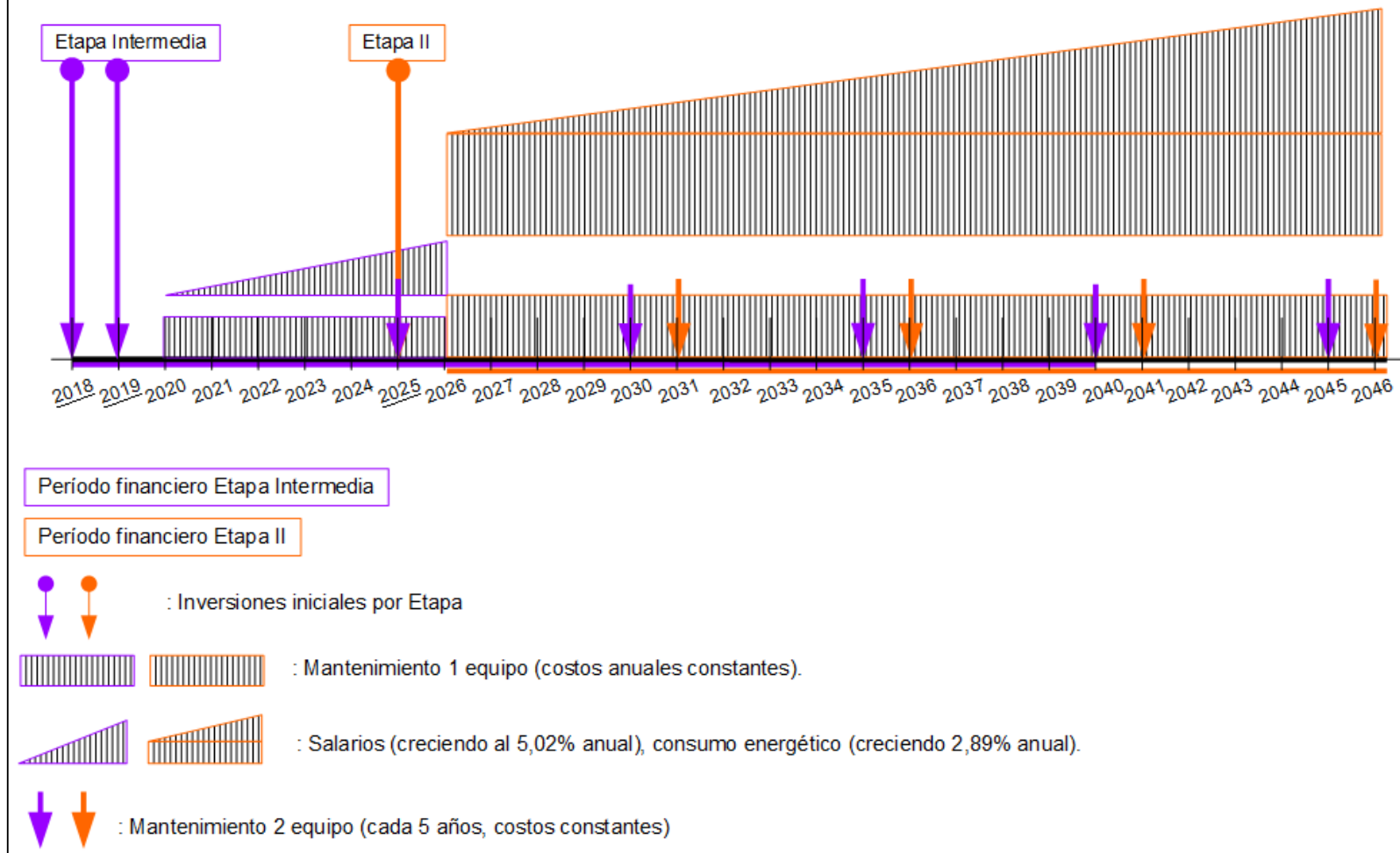


Figura 40. Diagrama de flujo para el Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados Convencionales (LAC).

Cuadro 113. Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados Convencionales (LAC) (Valores en miles US\$)

AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Periodos etapa intermedia	Construcción														
Periodos etapa II							Construcción								
Ingresos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapa Intermedia															
-Salarios Etapa Intermedia	0,00	0,00	181,76	190,88	200,46	210,53	221,09	232,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	62,76	62,76	62,76	62,76	62,76	62,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	209,21	0,00	0,00	0,00	0,00	209,21	0,00	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	1.369,60	1.409,18	1.449,90	1.491,80	1.534,92	1.579,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	1.468,29	1.562,62	1.656,94	1.751,27	1.845,60	1.939,88	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapa II															
-Salarios Etapa Intermedia + II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	291,56	306,20	321,57	337,71	354,66	372,47	391,16
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	83,61	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2.661,80	2.738,73	2.817,88	2.899,32	2.983,11	3.069,32	3.158,02
- Canon ambiental	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88
UAI	0,00	0,00	-3.082,40	-3.225,44	-3.370,07	-3.516,36	-3.664,37	-4.023,33	-4.981,10	-5.072,66	-5.167,18	-5.264,76	-5.574,71	-5.553,13	-5.576,92
- Imp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UDI	0,00	0,00	-3.082,40	-3.225,44	-3.370,07	-3.516,36	-3.664,37	-4.023,33	-4.981,10	-5.072,66	-5.167,18	-5.264,76	-5.574,71	-5.553,13	-5.576,92
- (Inversión + Terreno)	-27.133,46	-23.774,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-18.565,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo efectivo	-27.133,46	-23.774,15	-3.082,40	-3.225,44	-3.370,07	-3.516,36	-3.664,37	-22.588,82	-4.981,10	-5.072,66	-5.167,18	-5.264,76	-5.574,71	-5.553,13	-5.576,92

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Flujo Efectivo	-27.133,46	-23.774,15	-3.082,40	-3.225,44	-3.370,07	-3.516,36	-3.664,37	-22.588,82	-4.981,10	-5.072,66	-5.167,18	-5.264,76	-5.574,71	-5.553,13	-5.576,92
Valor Presente=	-27.133,46	-22.428,46	-2.743,33	-2.708,14	-2.669,41	-2.627,63	-2.583,24	-15.022,86	-3.125,20	-3.002,50	-2.886,33	-2.773,41	-2.770,46	-2.603,52	-2.466,68

AÑO	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046
Periodos etapa intermedia	15	16	17	18	19	20								
Periodos etapa II	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ingresos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapa Intermedia														
-Salarios Etapa Intermedia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	209,21	0,00	0,00	0,00	0,00	209,21	0,00	0,00	0,00	0,00	209,21	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapa II														
-Salarios Etapa Intermedia + II	410,80	431,42	453,08	475,83	499,71	524,80	551,14	578,81	607,87	638,38	670,43	704,08	739,43	776,55
-Mantenimiento 1 equipo	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85	87,85
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	83,61	0,00	0,00	0,00	0,00	83,61	0,00	0,00	0,00	0,00	83,61
-Consumo energético	3.249,29	3.343,19	3.439,81	3.539,22	3.641,51	3.746,75	3.855,03	3.966,44	4.081,07	4.199,01	4.320,36	4.445,22	4.573,69	4.705,87
- Canon ambiental	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88	1.939,88
UAI	-5.687,82	-5.802,35	-6.129,84	-6.126,39	-6.168,95	-6.299,27	-6.433,90	-6.782,19	-6.800,28	-6.865,12	-7.018,52	-7.177,03	-7.550,06	-7.593,76
- Imp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UDI	-5.687,82	-5.802,35	-6.129,84	-6.126,39	-6.168,95	-6.299,27	-6.433,90	-6.782,19	-6.800,28	-6.865,12	-7.018,52	-7.177,03	-7.550,06	-7.593,76
- (Inversión + Terreno)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo efectivo	-5.687,82	-5.802,35	-6.129,84	-6.126,39	-6.168,95	-6.299,27	-6.433,90	-6.782,19	-6.800,28	-6.865,12	-7.018,52	-7.177,03	-7.550,06	-7.593,76

Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Flujo Efectivo	-5.687,82	-5.802,35	-6.129,84	-6.126,39	-6.168,95	-6.299,27	-6.433,90	-6.782,19	-6.800,28	-6.865,12	-7.018,52	-7.177,03	-7.550,06	-7.593,76
Valor Presente=	-2.373,33	-2.284,07	-2.276,40	-2.146,34	-2.038,92	-1.964,14	-1.892,57	-1.882,09	-1.780,29	-1.695,54	-1.635,31	-1.577,58	-1.565,64	-1.485,57
VAC=	-124.141,41													

2. Diagrama de Flujo del VAC: Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS)

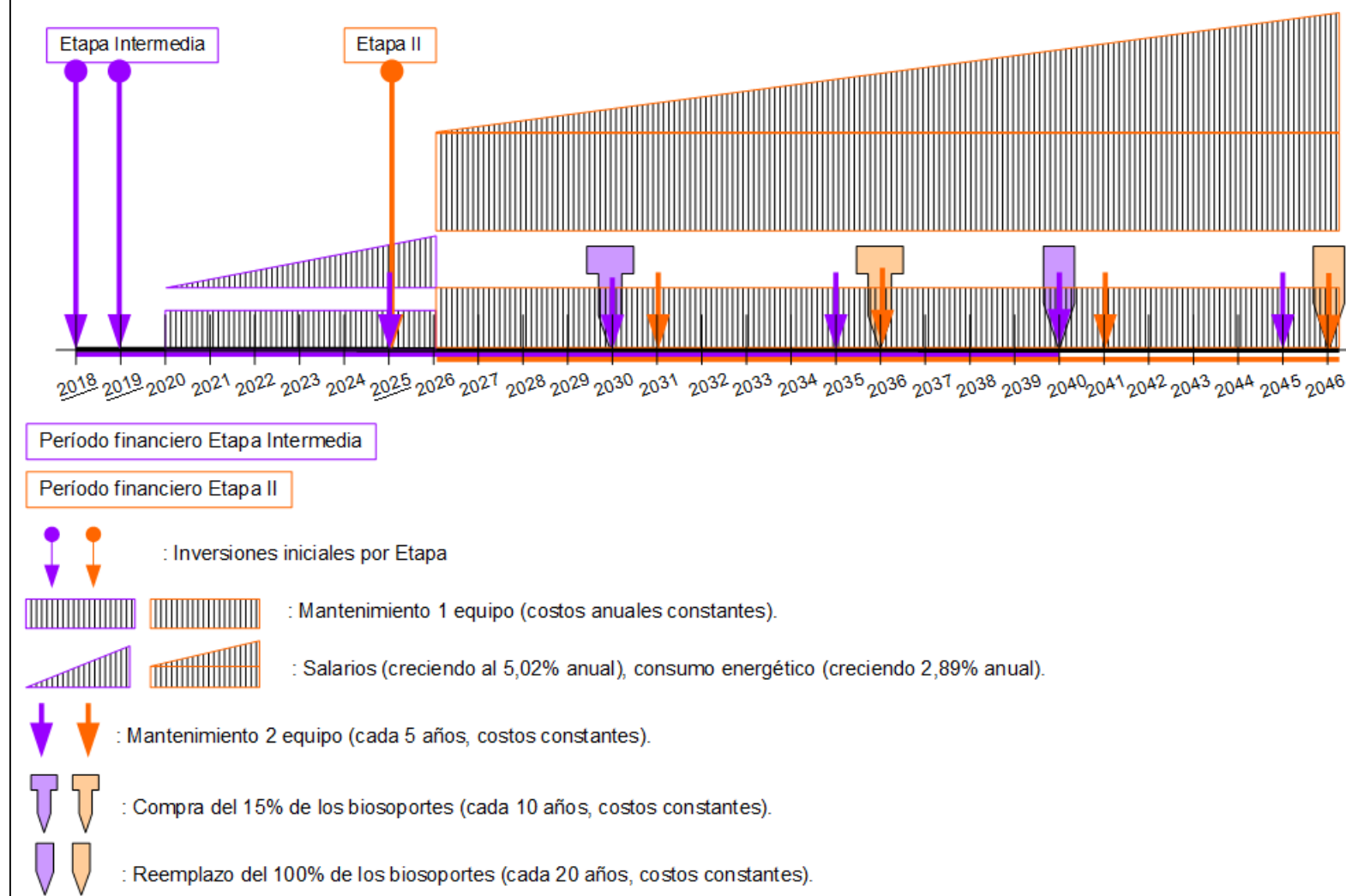


Figura 41. Diagrama de flujo para el Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS).

Cuadro 114. Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) (Valores en miles US\$)

AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Periodos etapa intermedia	Construcción							6	7	8	9	10	11	12	13
Periodos etapa II								Construcción	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla Intermedia															
-Salarios Etapa Intermedia	0,00	0,00	204,63	214,90	225,69	237,02	248,92	261,41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	65,91	65,91	65,91	65,91	65,91	65,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	219,71	0,00	0,00	0,00	0,00	219,71	0,00	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	2.077,28	2.137,31	2.199,08	2.262,63	2.328,02	2.395,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Biosoportos 15%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	663,49	0,00	0,00
- Reemplazo Biosoportos 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	1.080,66	1.150,08	1.219,51	1.288,93	1.358,36	1.427,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla II															
-Salarios Etapa Intermedia + II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	332,45	349,14	366,66	385,07	404,40	424,70	446,02
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	96,32	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4.839,39	4.979,25	5.123,15	5.271,21	5.423,55	5.580,29	5.741,56
- Reemplazo Biosoportos 15%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Biosoportos 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75
UAI	0,00	0,00	-3.428,48	-3.568,21	-3.710,19	-3.854,50	-4.001,21	-4.370,09	-6.694,40	-6.850,95	-7.012,38	-7.178,84	-8.233,71	-7.623,88	-7.710,14
- Imp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UDI	0,00	0,00	-3.428,48	-3.568,21	-3.710,19	-3.854,50	-4.001,21	-4.370,09	-6.694,40	-6.850,95	-7.012,38	-7.178,84	-8.233,71	-7.623,88	-7.710,14
- (Inversión + Terreno)	-28.243,96	-26.251,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-23.804,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo efectivo	-28.243,96	-26.251,53	-3.428,48	-3.568,21	-3.710,19	-3.854,50	-4.001,21	-28.174,51	-6.694,40	-6.850,95	-7.012,38	-7.178,84	-8.233,71	-7.623,88	-7.710,14

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Flujo Efectivo	-28.243,96	-26.251,53	-3.428,48	-3.568,21	-3.710,19	-3.854,50	-4.001,21	-28.174,51	-6.694,40	-6.850,95	-7.012,38	-7.178,84	-8.233,71	-7.623,88	-7.710,14
Valor Presente=	-28.243,96	-24.765,60	-3.051,33	-2.995,94	-2.938,82	-2.880,31	-2.820,70	-18.737,66	-4.200,15	-4.055,07	-3.915,68	-3.781,73	-4.091,90	-3.574,37	-3.410,20

AÑO	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046
Periodos etapa intermedia	14	15	16	17	18	19	20							
Periodos etapa II	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ingresos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla Intermedia														
-Salarios Etapa Intermedia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	219,71	0,00	0,00	0,00	0,00	219,71	0,00	0,00	0,00	0,00	219,71	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Biosoportos 15%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Biosoportos 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4.423,28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla II														
-Salarios Etapa Intermedia + II	468,41	491,93	516,62	542,55	569,79	598,39	628,43	659,98	693,11	727,91	764,45	802,82	843,12	885,45
-Mantenimiento 1 equipo	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81	94,81
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	96,32	0,00	0,00	0,00	0,00	96,32	0,00	0,00	0,00	0,00	96,32
-Consumo energético	5.907,49	6.078,22	6.253,88	6.434,62	6.620,58	6.811,91	7.008,78	7.211,33	7.419,74	7.634,17	7.854,79	8.081,80	8.315,36	8.555,68
- Reemplazo Biosoportos 15%	0,00	0,00	0,00	294,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Biosoportos 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.965,90
- Canon ambiental	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75	1.427,75
UAI	-7.898,47	-8.092,71	-8.512,77	-8.890,94	-8.712,93	-8.932,87	-9.159,77	-14.036,86	-9.731,74	-9.884,64	-10.141,80	-10.407,18	-10.900,75	-13.025,91
- Imp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UDI	-7.898,47	-8.092,71	-8.512,77	-8.890,94	-8.712,93	-8.932,87	-9.159,77	-14.036,86	-9.731,74	-9.884,64	-10.141,80	-10.407,18	-10.900,75	-13.025,91
- (Inversión + Terreno)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo efectivo	-7.898,47	-8.092,71	-8.512,77	-8.890,94	-8.712,93	-8.932,87	-9.159,77	-14.036,86	-9.731,74	-9.884,64	-10.141,80	-10.407,18	-10.900,75	-13.025,91

Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Flujo Efectivo	-7.898,47	-8.092,71	-8.512,77	-8.890,94	-8.712,93	-8.932,87	-9.159,77	-14.036,86	-9.731,74	-9.884,64	-10.141,80	-10.407,18	-10.900,75	-13.025,91
Valor Presente=	-3.295,75	-3.185,66	-3.161,34	-3.114,89	-2.879,74	-2.785,31	-2.694,40	-3.895,30	-2.547,74	-2.441,29	-2.363,03	-2.287,60	-2.260,47	-2.548,26
VAC=	-152.924,19													

3. Diagrama de Flujo del VAC: Biorreactores de Membrana (MBR)

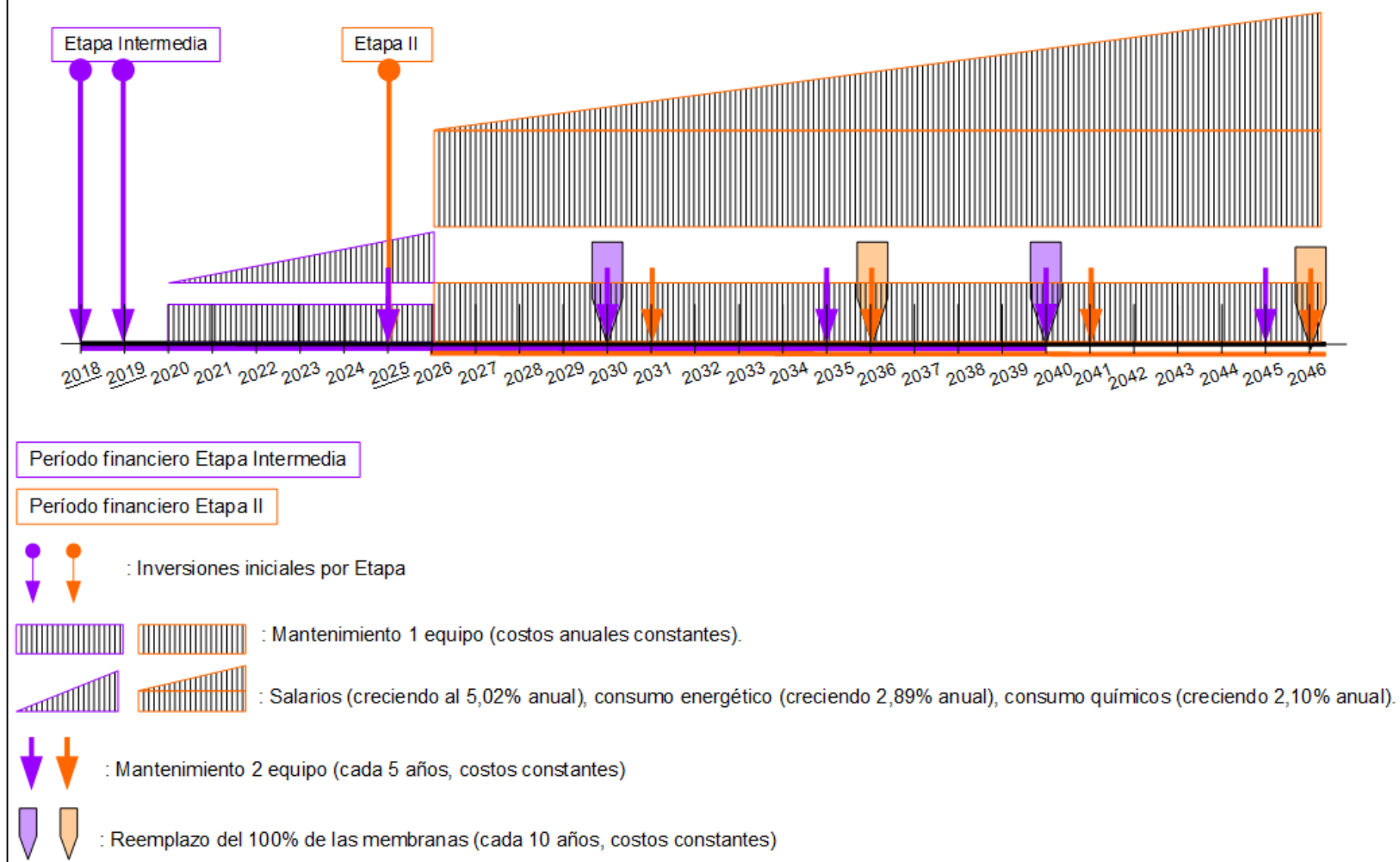


Figura 42. Diagrama de flujo para el Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR)

Cuadro 115. Valor Actual de Costos (VAC) de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR) (Valores en miles US\$)

AÑO	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
Periodos etapa intermedia	Construcción							6	7	8	9	10	11	12	13
Periodos etapa II								Construcción	1	2	3	4	5	6	7
Ingresos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla Intermedia															
-Salarios Etapa Intermedia	0,00	0,00	256,98	269,88	283,43	297,65	312,60	328,29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	123,16	123,16	123,16	123,16	123,16	123,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	410,53	0,00	0,00	0,00	0,00	410,53	0,00	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	2 618,59	2 694,26	2 772,13	2 852,24	2 934,67	3 019,49	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Consumo de quimicos	0,00	0,00	121,30	123,85	126,45	129,10	131,81	134,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Membranas 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16 629,89	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	417,97	444,82	471,68	498,53	525,38	552,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla II															
-Salarios Etapa Intermedia + II	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	423,13	444,37	466,67	490,10	514,70	540,54	567,68
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	193,87	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4 747,78	4 884,99	5 026,17	5 171,43	5 320,88	5 474,65	5 632,87
- Consumo de quimicos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	206,11	210,44	214,86	219,37	223,98	228,68	233,49
- Reemplazo Membranas 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22
UAI	0,00	0,00	-3.537,99	-3.655,97	-3.776,84	-3.900,68	-4.027,62	-4.568,26	-6.110,56	-6.273,34	-6.441,24	-6.614,44	-23.833,52	-7.171,28	-7.167,57
- Imp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UDI	0,00	0,00	-3.537,99	-3.655,97	-3.776,84	-3.900,68	-4.027,62	-4.568,26	-6.110,56	-6.273,34	-6.441,24	-6.614,44	-23.833,52	-7.171,28	-7.167,57
- (Inversión + Terreno)	-53.363,22	-51.886,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-49.163,78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo efectivo	-53.363,22	-51.886,12	-3.537,99	-3.655,97	-3.776,84	-3.900,68	-4.027,62	-53.732,04	-6.110,56	-6.273,34	-6.441,24	-6.614,44	-23.833,52	-7.171,28	-7.167,57

Año	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Flujo Efectivo	-53.363,22	-51.886,12	-3.537,99	-3.655,97	-3.776,84	-3.900,68	-4.027,62	-53.732,04	-6.110,56	-6.273,34	-6.441,24	-6.614,44	-23.833,52	-7.171,28	-7.167,57
Valor Presente=	-53.363,22	-48.949,17	-3.148,80	-3.069,62	-2.991,61	-2.914,82	-2.839,31	-35.734,88	-3.833,84	-3.713,18	-3.596,76	-3.484,40	-11.844,53	-3.362,18	-3.170,22

AÑO	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041	2042	2043	2044	2045	2046
Periodos etapa intermedia	14	15	16	17	18	19	20							
Periodos etapa II	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ingresos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla Intermedia														
-Salarios Etapa Intermedia	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 1 equipo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	410,53	0,00	0,00	0,00	0,00	410,53	0,00	0,00	0,00	0,00	410,53	0,00
-Consumo energético	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Consumo de quimicos	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Reemplazo Membranas 100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	16 629,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
- Canon ambiental	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Etapla II														
-Salarios Etapa Intermedia + II	596,17	626,10	657,53	690,54	725,21	761,61	799,84	840,00	882,16	926,45	972,96	1.021,80	1.073,09	1.126,96
-Mantenimiento 1 equipo	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32	181,32
-Mantenimiento 2 equipo	0,00	0,00	0,00	193,87	0,00	0,00	0,00	0,00	193,87	0,00	0,00	0,00	0,00	193,87
-Consumo energético	5.795,66	5.963,16	6.135,49	6.312,81	6.495,25	6.682,96	6.876,10	7.074,82	7.279,28	7.489,65	7.706,10	7.928,81	8.157,95	8.393,72
- Consumo de quimicos	238,39	243,39	248,51	253,72	259,05	264,49	270,05	275,72	281,51	287,42	293,46	299,62	305,91	312,33
- Reemplazo Membranas 100%	0,00	0,00	0,00	8.314,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8.314,94
- Canon ambiental	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22	552,22
UAI	-7.363,76	-7.566,19	-8.185,59	-16.499,42	-8.213,04	-8.442,60	-8.679,53	-25.964,48	-9.370,35	-9.437,06	-9.706,05	-9.983,76	-10.681,02	-19.075,36
- Imp	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
UDI	-7.363,76	-7.566,19	-8.185,59	-16.499,42	-8.213,04	-8.442,60	-8.679,53	-25.964,48	-9.370,35	-9.437,06	-9.706,05	-9.983,76	-10.681,02	-19.075,36
- (Inversión + Terreno)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo efectivo	-7.363,76	-7.566,19	-8.185,59	-16.499,42	-8.213,04	-8.442,60	-8.679,53	-25.964,48	-9.370,35	-9.437,06	-9.706,05	-9.983,76	-10.681,02	-19.075,36

Año	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Flujo Efectivo	-7.363,76	-7.566,19	-8.185,59	-16.499,42	-8.213,04	-8.442,60	-8.679,53	-25.964,48	-9.370,35	-9.437,06	-9.706,05	-9.983,76	-10.681,02	-19.075,36
Valor Presente=	-3.072,64	-2.978,40	-3.039,84	-5.780,47	-2.714,52	-2.632,44	-2.553,13	-7.205,28	-2.453,13	-2.330,75	-2.261,50	-2.194,53	-2.214,90	-3.731,72
VAC=	-231.179,78													

Los resultados del análisis financiero por la metodología del VAC, se presentan resumidos en el Cuadro 116, donde se agrega información referente a: (1) costo de la adquisición del terreno, (2) inversión inicial para el conjunto de todo el proyecto (etapa intermedia y etapa II), y (3) el resultado del VAC únicamente para el rubro de canon ambiental por vertidos.

Cuadro 116. Resumen de resultados del análisis financiero de las tres tecnologías analizadas (etapa intermedia + etapa II)

Tecnología	Costo de la adquisición del terreno (millones de US\$)	Inversión inicial (millones de US\$)	VAC del Canon (millones de US\$)	VAC (millones de US\$)
LAC	4,51	64,97	-23,01	-124,14
IFAS	2,93	75,37	-16,93	-152,92
MBR	2,25	152,16	-6,55	-231,18
Notas:				
(1) Todos los valores presentados corresponden a la totalidad del proyecto (etapa intermedia + etapa II)				
(2) La columna de inversión inicial no incluye los costos del terreno.				

El costo de la adquisición del terreno (sumando ambas etapas del tratamiento secundario) para la tecnología de LAC corresponde al 6,5% del total de la inversión (incluyendo el terreno), mientras que para la tecnología IFAS corresponde al 3,7% y para la tecnología de MBR, el terreno es apenas el 1,5% de toda la inversión inicial. Estos bajos porcentajes se deben a que el valor del terreno en la zona de Los Tajos es muy bajo, por lo que este costo no es significativo frente a los altos costos de inversión inicial.

Tanto el VAC del canon, como el VAC para todas las tecnologías, resultan negativos (Cuadro 116), pues se realizó un análisis de sólo costos (gastos) excluyendo el componente de ingresos.

Al traer a valor presente los futuros pagos por el canon ambiental para las tres tecnologías, es evidente que el VAC del canon de la tecnología de MBR es el más favorable, debido a la alta calidad del efluente final de esta tecnología. Considerando el período económico de análisis, implementando la tecnología de MBR se tendría que pagar 3,52 veces menos que para la tecnología LAC y 2,58 veces menos que para la tecnología IFAS.

Al analizar todas las inversiones y todos los costos de O&M involucrados durante la vida económica de 20 años, el resultado total del VAC para la tecnología de LAC es el mayor de todos, seguido del resultado para la tecnología IFAS, el cual es aproximadamente 1,23 veces menor que el resultado de la tecnología LAC. El VAC de la tecnología MBR es 1,86 veces menor que el de la tecnología LAC, mientras que es 1,51 veces menor que el de la tecnología IFAS.

Exceptuando el costo por la adquisición de terreno y el pago por canon ambiental, para los demás costos (tanto de inversión como de O&M), la tecnología MBR es la más costosa, mientras que la tecnología de LAC es la de menor inversión y la más económica a lo largo del período de análisis.

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS

MULTICRITERIO (AMC)

CAPÍTULO VII. ANÁLISIS MULTICRITERIO (AMC)

7.1. Criterios a considerar en el análisis multicriterio

El análisis multicriterio considera los nueve principales criterios para la comparación entre las tecnologías, los cuales se agrupan en cuatro grandes grupos: técnico, económico-financiero, ambiental y social. Los pesos de cada grupo (porcentajes) fueron seleccionados con criterio técnico por parte de la autora y un profesional experto. Los criterios a considerar se indican a continuación:

1. Técnico (30%):

- Área de terreno
- Facilidades operativas
- Experiencia institucional (AyA)
- Sensibilidad ante picos de caudal o concentración

2. Económico-financiero (30%):

- Resultado del VAC

3. Ambiental (25%):

- Consumo energético
- Calidad del efluente
- Producción de lodos

4. Social (15%):

- Posibilidad de reúso (regeneración)

La Figura 43 muestra un esquema gráfico con los criterios de análisis multicriterio, considerando los porcentajes o pesos de cada criterio.



Figura 43. Diagrama esquemático de los criterios a considerar en el análisis multicriterio para la selección de la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos.

7.2. Asignación de valores para la ponderación de criterios

Este análisis tomó en cuenta los niveles de importancia de Sperling (2007a), clasificando cada criterio en (1) crítico o (2) importante. Posteriormente, se les asignó un “coeficiente de ponderación”. Se les asignó coeficientes de ponderación altos a los criterios críticos (con un máximo de 15), mientras que, a los criterios importantes, se les asignaron valores menores (con un máximo de 9). El Cuadro 117 muestra los aspectos clasificados en críticos o importantes, y los coeficientes de ponderación asignados.

Cuadro 117. Niveles de importancia y coeficientes de ponderación asignados

CRÍTICOS		IMPORTANTES	
Criterio	Coeficiente de ponderación	Criterio	Coeficiente de ponderación
Facilidades operativas	15	Sensibilidad a picos de caudal/concentración	9
VAC (resultado del análisis financiero)	15	Experiencia AyA	8
Calidad del efluente	15	Posibilidad de reúso (sin tratamientos adicionales)	8
Área de terreno	14	Producción de lodos	7
Consumo energético	13		

Una vez determinados los criterios de análisis con sus respectivos coeficientes de ponderación, se debe calificar cada tecnología individualmente. Dicha calificación siguió una escala de valores (propuesta para este TFG) que va del número 1 (desfavorable) al número 4 (favorable), de manera que se cuantificaron en cuatro niveles las ventajas y desventajas de una tecnología con respecto a otra. La escala para los valores de calificación se presenta en el Cuadro 118.

Cuadro 118. Escala de valores de calificación para la evaluación de cada criterio.

Valor de calificación	Característica
1	Desfavorable
2	Medio-Desfavorable
3	Medio-Favorable
4	Favorable

La asignación de los valores de ponderación se realizó con criterio técnico, a partir de un análisis subjetivo de cada aspecto, con la finalidad de satisfacer las principales necesidades del proyecto.

Las tres tecnologías de tratamiento secundario se evalúan individualmente, calificando cada criterio según los resultados obtenidos en el prediseño respectivo, el análisis teórico realizado y los resultados del VAC.

7.3. Descripción de los criterios de evaluación

7.3.1. Criterios técnicos

7.3.1.1. Área de terreno

El prediseño propuesto mediante la tecnología de LAC (según la recomendación del estudio SAPROF, 2004) requería de la adquisición de los dos terrenos Los Tajos (Sur y Norte) para ubicar las unidades de tratamiento necesarias hasta la etapa II, aspecto que fue tomado en consideración por parte del AyA. Debido a las características óptimas de dichos terrenos (topografía, ubicación, cercanía a cuerpos de agua, etc.), es posible que a futuro se desee aumentar la cobertura de la red de alcantarillado sanitario de San José, o se desee incorporar otras áreas urbanas de la GAM, adicionales a las planificadas dentro de la etapa II. El área de terreno es un aspecto crítico para la selección de la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos.

Las tres tecnologías de tratamiento secundario analizadas se consideran intensivas, pues a diferencia de los sistemas lagunares, requieren menos área de terreno para un mismo caudal de aguas residuales a tratar (European Commission, 2001). El caso particular de la PTAR Los Tajos, según las áreas de terreno calculadas en la sección 5.5., el prediseño mediante la tecnología de IFAS reduce en un 35% el área de terreno de la propuesta de LAC, lo que confirma que la tecnología IFAS es más intensiva que la tecnología de LAC, pues al introducir los biosoportos dentro de los tanques de aireación, aumenta el área superficial disponible para el crecimiento de la biomasa, reduciendo el volumen del tanque de aireación (Davis et al., 2009). Ambos casos (LAC e IFAS) requieren colocar unidades de clarificación posterior a los tanques de aireación, las cuales generalmente requieren grandes cantidades de terreno.

La huella constructiva de la tecnología MBR, es considerablemente menor que la de las instalaciones de lodo activado convencional (Kubota, 2017). Al realizar la filtración mediante las membranas, no requiere unidades de clarificación posterior a las mismas, reduciendo notablemente el área de terreno requerida, siendo más intensiva que las dos anteriores (Hai et al., 2014). Además, los reactores (tanques de membranas) generalmente tienen un tamaño menor, debido a la alta concentración de sólidos (Melin et al., 2005), lo que puede reducir la superficie de la planta en un 50% o más (Fundación Centro Canario del Agua, 2003). El área de terreno mediante la tecnología MBR se reduce en un 50% con respecto a la de LAC, porcentaje que coincide con los indicados en las referencias bibliográficas.

7.3.1.2. Facilidades operativas

La facilidad de las labores de operación de una determinada tecnología de tratamiento, es un aspecto que simplifica tanto la puesta en marcha del sistema, como su vida operativa. Algunas de las ventajas comparativas de un sistema fácil de operar son: mayor eficiencia en las labores de los operadores, mayor control de las actividades a realizar, agilidad para la determinación y atención de eventualidades (problemas o errores), perfiles más generales en los operadores y facilidad para capacitarlos, entre otras ventajas.

Las tres tecnologías analizadas comparten algunas de las actividades operativas; sin embargo, otras actividades requieran mayores capacidades técnicas según el nivel de automatización en la PTAR. La tecnología IFAS, al ser una modificación de la tecnología de LAC, cuenta con muchas similitudes en las actividades operativas, con algunos pocos aspectos en los que se requieren mayores capacidades y conocimiento técnicos del personal (Ordoñez, 2016).

La tecnología MBR requiere actividades muy especializadas. Es un sistema que requiere un alto nivel de automatización y control (Melin et al., 2005). Sólo si se cuenta con un buen control del proceso, se considera un sistema fiable y estable (Buer et al., 2009). Sin embargo, el proceso tiene un gran riesgo de fallas y su dificultad operativa es alta. Se requieren conocimientos técnicos particulares para su óptima operación, por lo que el personal deberá estar altamente calificado, aspecto que deberá tomarse en cuenta para la selección de los perfiles del personal.

La actividad que demanda más mantenimiento y monitoreo frecuente en la tecnología MBR, es la limpieza de las membranas (Melin et al., 2005), lo que además, requiere el uso constante de sustancias químicas (ácido cítrico y ácido sulfúrico) para las limpiezas periódicas, lo que implica riesgos adicionales por la posible exposición de los operadores a dichas sustancias (INSHT, 1998) (ASEPEYO, 2009).

7.3.1.3. Experiencia institucional

El AyA administra y opera PTARs de aguas ordinarias (y/o municipales) en todo el país. Tiene experiencia en diversidad de tecnologías, tanto de tratamiento aeróbico, como anaeróbico. Actualmente los sistemas aeróbicos con que cuenta son: LAC (1 sistema), LAE (7 sistemas) y recientemente la tecnología IFAS como caso exitoso (1 sistema).

Tener experiencia en la operación de una determinada tecnología, favorece en aspectos como:

- Es más sencilla la puesta en marcha de un nuevo sistema.

- Es más ágil la transferencia de conocimiento de técnicos y profesionales con experiencia, hacia el nuevo personal operativo de la PTAR.
- Las lecciones aprendidas de la operación de una determinada tecnología, permiten prevenir algunos problemas operativos que se presenten durante el funcionamiento de la PTAR, así como resolver con más facilidad y con criterio técnico posibles dificultades que acontezcan.

No se conoce ningún sistema municipal (público o privado) que esté operando mediante la tecnología de MBR. Incluso, a nivel latinoamericano existen pocos países que han implementado este sistema, Brasil es uno de ellos, donde se cuenta con dos PTARs municipales con esta tecnología: Campos do Jordao (350 l/s) y ABC-Proyecto Aquapolo (1 m³/s) ambas administradas por la SABESP (Araya, 2014).

7.3.1.4. Sensibilidad a picos de caudal o concentración

La experiencia del AyA en operar sistemas de saneamiento, permite afirmar que existe un importante problema a nivel nacional, de conexiones ilícitas del sistema de alcantarillado pluvial hacia el alcantarillado sanitario (AyA y OPS, 2002) que genera picos importantes de caudal en época lluviosa a la entrada de los sistemas de tratamiento. Así mismo, existen aspectos como: descargas de entes generadores (domésticos o industriales) que no cumplen con los límites de vertido del RVRAR (AyA y OPS, 2002), alterando significativamente la calidad del agua residual cruda, lo que afecta la capacidad de remoción de contaminantes en los sistemas de tratamiento municipales.

Actualmente, la PTAR Los Tajos no cuenta con un tanque de homogenización donde se puedan amortiguar sobrecargas orgánicas o picos de caudal. El prediseño del tratamiento primario de esta PTAR descartó esta unidad, principalmente por las grandes dimensiones que se requieren para ecualizar un caudal de diseño de 2,81 m³/s (etapa I e intermedia), que implicaban una extensa área de terreno y un alto costo de construcción.

Se determinó que la tecnología LAC es sensible a fluctuaciones fuertes de caudal o concentración. La tecnología IFAS, por la presencia de los biosoportes y la configuración de los tanques, atenúa más fácilmente los picos de carga y caudal (Mittal, 2011). La tecnología MBR, al combinar el proceso biológico de LAC con la filtración por medio de membranas, soporta las variaciones en la composición de las aguas residuales, así como las fluctuaciones en los flujos (Radjenović et al., 2008).

7.3.2. Criterio económico-financiero

7.3.2.1. Valor Actual de Costos (VAC)

El análisis financiero de las tres tecnologías estudiadas se realizó en la sección 6.5, mediante el método del Valor Actual de Costos (VAC). Este análisis incluyó los siguientes costos:

- Inversión inicial:
 - Adquisición del terreno
 - Construcción: obra civil y equipamiento, incluidas las unidades de pretratamiento adicionales para la tecnología MBR (rototamiz de 1 mm)
- O&M: consumo energético, salarios del personal, mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos, consumo de sustancias químicas (para el caso de la tecnología MBR), reemplazo de equipamiento por vida útil (para el caso de IFAS y MBR).
- Canon ambiental de vertido: (según Decreto Ejecutivo N°34431-MINAE-S) única valoración económica de los aspectos ambientales considerada en el análisis.

Debido a que en el VAC se incluyen todos los costos, no se analizó cada uno por aparte dentro del análisis multicriterio, haciendo de este criterio crítico para la selección de la mejor tecnología.

7.3.3. Criterios ambientales

7.3.3.1. Consumo energético

El consumo energético es el principal componente de los costos operativos de una PTAR (Albadalejo et al., 2015), aspecto que se vio reflejado en las tres tecnologías analizadas de este TFG (Cuadro 92, Cuadro 99 y Cuadro 106Cuadro 107). Sin embargo, el consumo de energía no es un tema únicamente económico, sino también ambiental. Conforme pasan los años, crece la preocupación mundial sobre la disponibilidad de las fuentes de energía para suministrar la demanda requerida en las diferentes actividades productivas del ser humano, incluyendo las operaciones de las PTARs (Tchobanoglous et al., 2004).

El tema del consumo energético en PTARs es cada vez más importante, aspecto que se toma en cuenta para la elección de los procesos de tratamiento (Tao et al., 2012), así como para su diseño y operación, enfocándose cada vez más en mejorar la eficiencia del uso de la energía eléctrica (Tchobanoglous et al., 2004).

Dentro del Plan Nacional de Energía (2015-2030), se menciona que Costa Rica debe sumarse a los esfuerzos globales por revertir las tendencias del cambio climático, por lo que debe contribuir cada

vez más en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (MINAE, 2015). Parte de las estrategias para lograrlo son: incentivar la eficiencia energética, el ahorro y mejor manejo de la demanda de electricidad, estimular la generación para autoconsumo, entre otras.

La PTAR Los Tajos cuenta con un sistema de generación de energía por medio de la digestión anaeróbica de los lodos, con lo que es posible el autoconsumo de energía para diferentes procesos internos de la PTAR, aspecto que cumple con una de las estrategias del Plan Nacional de Energía.

El tratamiento secundario es el responsable del mayor consumo de energía en una PTAR, principalmente por los sistemas de aireación (Longo et al., 2016). Las tres tecnologías analizadas para el tratamiento secundario, corresponden a tratamientos aeróbicos (con etapas anóxicas en el caso de MBR), donde se requieren principalmente equipos mecánicos para aireación, además de otros para el bombeo. Al tener en cuenta las políticas nacionales de ahorro energético, se debe buscar una tecnología que no represente un consumo excesivo de energía. Además, se deben seleccionar los equipos más eficientes del mercado.

Las estimaciones de consumo energético realizadas en la sección 5.7 para los prediseños de las tres tecnologías, mostraron que la tecnología de LAC es la que menor energía consume, seguida de IFAS que consume 1,5 veces la energía de LAC y la tecnología de MBR que consume 1,9 veces más energía que la tecnología de LAC (Cuadro 64).

7.3.3.2. Calidad del efluente

Actualmente, en Costa Rica la regulación ambiental en el tema de vertido de aguas residuales no es muy rigurosa. Si bien es cierto, el Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales (Decreto Ejecutivo N°33601-S-MINAE) ha sido el paso más firme en vigilancia y control en la recolección y tratamiento de las aguas residuales (Villalobos, A.; Íncer, A. 2011); al comparar los L.M.P. de vertido de agua residual doméstica con los regulados en países europeos o algunos lugares de Canadá, se concluye que los límites del D.E. N°33601-S-MINAE son muy bajos.

Dentro de los parámetros de calidad del efluente solicitados en la normativa nacional, para aguas residuales ordinarias vertidas a cuerpos receptores, no se incluyen nutrientes (nitrógeno, fósforo), metales pesados y otros contaminantes (Briceño, 2016), por lo que las tecnologías convencionales de tratamiento (que incluyen hasta el tratamiento secundario) continúan siendo opciones viables y efectivas para el cumplimiento de la regulación costarricense.

Se proyecta que la regulación nacional de vertido de aguas residuales sea más estricta a futuro, con el objetivo de reducir gradualmente la carga contaminante vertida a los cuerpos receptores (RVRAR, 2007). Esto implica que la tecnología de tratamiento a utilizar en las PTARs, en el

momento en que se soliciten mayores L.M.P., deberá cumplir con una remoción de los contaminantes más rigurosa, requiriéndose niveles superiores de tratamiento.

Proyectando esta necesidad en el futuro, la calidad del efluente es un aspecto que se compara entre las tres tecnologías estudiadas. La sección 5.6 presentó las calidades esperadas de los efluentes de cada tecnología, y en el Cuadro 55 se compararon los valores de los parámetros de calidad del agua tratada más importantes, donde se muestra que el efluente esperado de la tecnología de MBR tendrá una calidad mucho mejor (similar a un tratamiento terciario) que las tecnologías de LAC e IFAS.

7.3.3.3. Producción de lodos

La producción de los lodos es un aspecto que debe considerarse, pues entre mayor cantidad de lodos se produzcan en una determinada tecnología, mayor capacidad de tratamiento y disposición de lodos se requerirán. El Cuadro 119 presenta la cantidad de lodo de desecho para cada tecnología, según las estimaciones realizadas en el capítulo V.

Cuadro 119. Producción anual de lodos (secundarios) de cada tecnología.

Tecnología	Cantidad de lodos de desecho (Ton/año)	
	Etapas intermedia	Etapas intermedia + etapas II
LAC	12.977	20.446
IFAS	17.588	25.404
MBR	19.464	29.196

Fuente: Acciona Agua S.A.U. 2010, Headworks Bio Inc. 2016, Evoqua 2016 y estimaciones de la autora.

Se calculó la masa de lodos por unidad de volumen de aguas residuales a tratar, con el objetivo de tener datos comparables unitarios. El Cuadro 120 se muestra la cantidad de lodos (secundarios) de desecho, en kg/m³.

Cuadro 120. Cantidad de lodos (secundarios) de desecho por unidad de volumen de agua residual a tratar

Tecnología	Cantidad de lodos de desecho por QPD (kg/m ³ de agua a tratar)	
	Etapas intermedia	Etapas intermedia + etapas II
LAC	0,15	0,15
IFAS	0,20	0,19
MBR	0,25	0,25

Fuente: Acciona Agua S.A.U., 2010; Headworks Bio Inc., 2016, Evoqua, 2016a y 2016b.

Como se observa en el Cuadro 119 y el Cuadro 120, la producción de lodos específica para este proyecto, resulta menor en la tecnología de LAC, seguido de la tecnología IFAS y finalmente la tecnología de MBR.

Este TFG no analizó la línea de lodos, los datos anteriores son insumo para el cálculo de las capacidades máximas de tratamiento de la línea de lodos por cada tecnología, para el diseño final del tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos.

7.3.4. Criterios sociales

La PTAR Los Tajos se ubica en una zona urbana, cercana a la ciudadela (barrio) La Carpio. Parte de la población de La Carpio al inicio no estuvo de acuerdo con la implantación de la PTAR en sus proximidades. Se realizaron dinámicos procesos participativos con la población, donde se trataron, entre algunos temas, la reducción del impacto social de las plantas de tratamiento de aguas residuales en las comunidades donde se construyen. Es por esto que, desde la concepción del proyecto, el tema de reducción de ruido y malos olores ha sido considerado y aplicado en la infraestructura existente y propuesta.

No se consideró el tema de olores y ruido dentro del AMC de este TFG, pues las tres tecnologías analizadas, al ser aeróbicas, no cuentan con problemas de olores y, además, la PTAR ya cuenta con una línea de tratamiento de gases para las unidades de tratamiento preliminar y primario. Con respecto al ruido, se están considerando equipos con aislamiento del ruido (sopladores con equipo de sonorización), y se pretende ubicarlos lejos de la población más próxima.

7.3.4.1. Posibilidad de reúso (regeneración)

Malgarejo (2009) indica que “las actuaciones de reutilización de aguas depuradas no deben contemplarse aisladamente y en función exclusiva del beneficio que pueda producir en el usuario. Las aguas regeneradas han de considerarse como un recurso no convencional, cuya gestión debe incluirse en una planificación integral de los recursos hídricos, que tenga en cuenta los aspectos económicos, sociales y medioambientales”.

La regeneración del agua es particularmente atractiva en situaciones donde el abastecimiento del agua está comprometido y no puede satisfacer la demanda de agua de una comunidad en crecimiento (CONAGUA, 2016). En este sentido, las aguas residuales municipales tratadas representan una fuente más confiable y significativa de agua regenerada, en comparación con aguas residuales procedentes de flujos de retorno agrícola, escorrentía de aguas pluviales y descargas industriales (Asano, et al. 2007).

Estudios realizados en la Subgerencia Gestión de Sistemas GAM del AyA, indican que

actualmente existe un déficit de abastecimiento de agua potable por parte del Acueducto Metropolitano del AyA, de 370 l/s en época lluviosa y de 959 l/s en época seca (AyA, mayo 2017), lo que ha obligado a implementar programas de racionamiento en algunas zonas del Acueducto Metropolitano durante la época seca. Este déficit se debe principalmente a los siguientes factores:

- 1- *Deficiencia en la producción:* muchas fuentes de producción (superficiales y subterráneas), ante el fenómeno del Niño (ENOS) de los últimos años, han tenido un fuerte descenso en la capacidad de producción.
- 2- *Deficiencia en infraestructura:* limitada capacidad de la infraestructura (tanques de almacenamiento, líneas de conducción y redes de distribución) para brindar un servicio continuo de abastecimiento a todos los usuarios durante todo el año.
- 3- *Aumento de la demanda:* crecimiento poblacional con el consecuente aumento de la demanda de agua potable, la cual ha tenido un crecimiento mayor que la incorporación de nuevas fuentes de producción. Este problema es mayor en época seca.

El AyA, ante el panorama de escasez en el abastecimiento de agua potable, tiene proyectado para los próximos años la incorporación de nuevos sistemas de producción, entre los que se encuentran: aprovechamiento de nuevos pozos (del 2017 al 2020) y el Proyecto Quinta Etapa del Acueducto Metropolitano AyA (a implementar en el 2023). Además, actualmente se está ejecutando el Proyecto de Reducción de Agua No Contabilizada y Eficiencia Energética (Proyecto RANC-EE) con el que se pretende controlar las pérdidas de agua (reduciendo el porcentaje de agua no contabilizada) para mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución de agua potable (AyA, setiembre 2016).

La Subgerencia de Gestión de Sistemas del Gran Área Metropolitana (SG-GAM) ha realizado estudios para determinar la demanda de agua potable del Acueducto Metropolitano y de los acueductos de las zonas aledañas (ESPH, municipalidades y ASADAS de la GAM) hasta el 2050, a partir de las proyecciones de población del INEC para la GAM y con los planes de desarrollo urbano PRUGAM y PLAN-GAM.

Los estudios de la SG-GAM han determinado que el crecimiento de la población dentro de la GAM, con la correspondiente demanda de agua potable para uso residencial y otros usos urbanos, agravado por (1) la escasez del recurso hídrico, (2) la existencia de tomas de agua superficiales en estado de vulnerabilidad (ante la contaminación y reducción de caudales) por la alta intervención de las actividades habitacionales y productivas en las respectivas cuencas, y (3) la limitada capacidad de aumentar la producción de los acueductos del AyA y de los acueductos de las zonas

aledañas (AyA, setiembre 2016); indican que entre el 2036 y el 2040, nuevamente existirá un déficit de abastecimiento, para el cual no se tienen planificados proyectos concretos que solventen las futuras carencias del recurso hídrico (Núñez, 2017).

La Figura 44 muestra la proyección de las demanda de agua en el Acueducto Metropolitano y de las zonas aledañas (en condiciones de demanda promedio y máxima en verano), con la superposición de la proyección de la producción confiable para el Acueducto Metropolitano del AyA, incluyendo los proyectos nuevos.

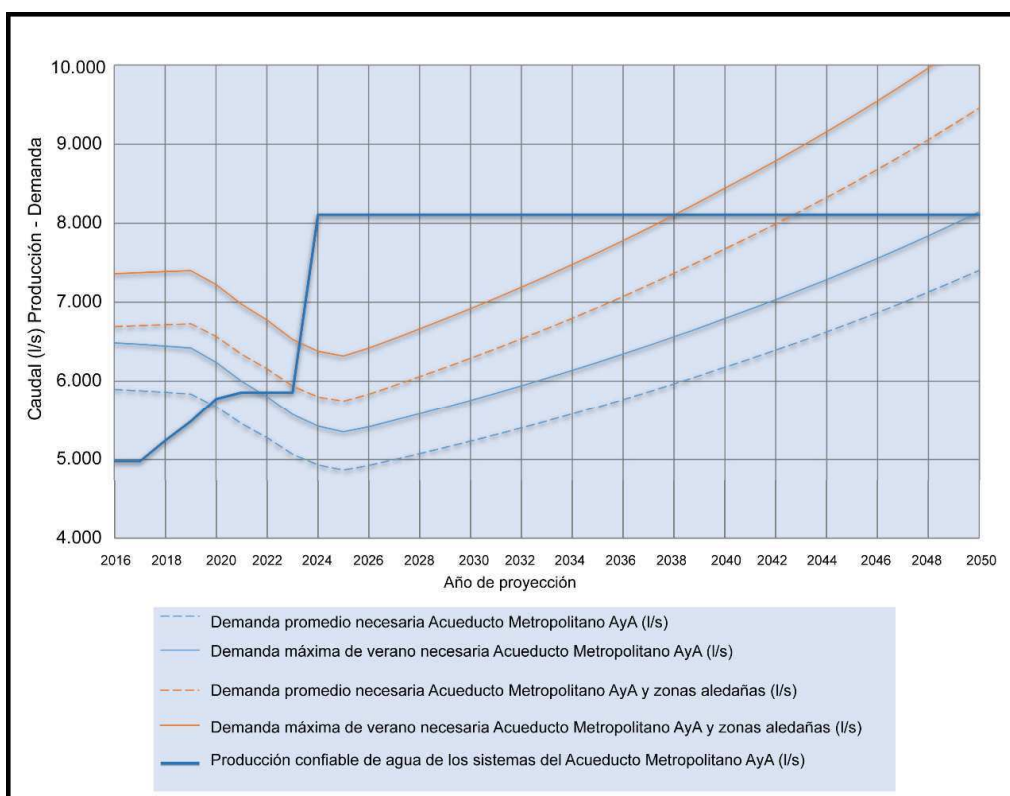


Figura 44. Gráfico de producción y demanda proyectadas para el Acueducto Metropolitano del AyA y zonas aledañas

Fuente: AyA, 2017.

Como se observa en la Figura 44, el Proyecto Quinta Etapa del Acueducto Metropolitano del AyA (línea horizontal operando a partir del 2024) abastecerá cerca de 2.500 l/s, los cuales podrán mantener la demanda hasta un límite, en el que ésta, por el crecimiento poblacional y de las actividades urbanas, supere la producción. Ante este nuevo déficit, será necesaria la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento, para años futuros.

La Política Nacional de Saneamiento de Aguas Residuales 2016-2045 (MINAE, MS y AyA, 2016), indica como una acción estratégica la definición de cuotas de reutilización de aguas tratadas en

zonas con baja disponibilidad del recurso hídrico y en los sectores industriales de gran demanda de agua donde sea factible tecnológicamente, según las calidades y usos del agua.

El reúso del efluente de la PTAR Los Tajos, es una posible alternativa para satisfacer la demanda del recurso, pues para la etapa II de la PTAR se estarían descargando cerca de 4.260 l/s, los cuales podrían ser reutilizados (Núñez, 2017). Este caudal de agua tratada podría aliviar el déficit que se estaría presentando cerca del 2040, aportando agua regenerada principalmente para actividades industriales, aquellas ubicadas aguas abajo de la descarga del efluente (para reducir costos operativos por bombeo), por ejemplo, en zonas como San Rafael de Alajuela, la Guácima, Coyol, entre otras. Reutilizar estas aguas implicaría para el AyA, la posibilidad de tener un producto para su comercialización, aspecto que se determina a partir de un estudio de mercado de potenciales compradores del agua regenerada. Sin embargo, para lograr este objetivo, se deberá modificar el RVRAR (Decreto Ejecutivo N°33601-S-MINAE), de manera que se amplíen las categorías de reusos (Cuadro 14), abarcando actividades industriales de diversos tipos.

El trasiego de las aguas regeneradas requerirá una inversión importante en infraestructura y terrenos para servidumbres, lo que implica la realización de un estudio de factibilidad y análisis de recuperación de la inversión, para comparar esta solución a nivel técnico, ambiental y financiero con otras posibles soluciones ante la problemática de escases del recurso hídrico en la GAM.

Al comparar el potencial de reúso de las tres tecnologías analizadas, considerando un posible reúso en actividades industriales (que impliquen requerimientos más estrictos que los límites de vertido a cuerpos receptores), por la calidad del efluente de las tecnologías LAC e IFAS, ambas requieren de un sistema terciario para poder hacer reúso de las aguas tratadas; a diferencia de la tecnología MBR, en la cual es posible reusar directamente el efluente (o al menos con un mínimo tratamiento posterior) resultante del tratamiento de filtración con membranas.

7.4. Resultados del análisis multicriterio

El Cuadro 121 muestra el análisis multicriterio (AMC) con las asignaciones de valores para cada criterio y el resultado final. La toma de decisión en un AMC implica la participación de actores (agentes decisores) de diversas disciplinas, con conocimiento en cada criterio de análisis (Grajales et al., 2013). El AMC de este TFG se realizó con un único agente decisor: la autora, por lo que se busca la imparcialidad de los resultados.

Cuadro 121. Matriz de análisis multicriterio para determinar la mejor tecnología de tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos.

Criterio	Calificación	LAC	IFAS	MBR
TÉCNICO	30%			
Facilidades operativas	15	3	3	1
Área de terreno	14	1	3	4
Sensibilidad picos de caudal/concentración	9	2	3	3
Experiencia institucional (AyA)	8	4	3	1
<i>Subtotal</i>		33	41	32
ECONÓMICO-FINANCIERO	30%			
VAC (Incluye: costos del terreno, costos de construcción, costos de O&M, canon ambiental)	15	4	3	1
<i>Subtotal</i>		18	14	5
AMBIENTAL	25%			
Calidad del efluente	15	2	2	4
Consumo energético	13	3	2	1
Producción de lodos	7	3	2	1
<i>Subtotal</i>		23	18	20
SOCIAL	15%			
Posibilidad de reúso (sin tratamientos adicionales)	8	1	1	4
<i>Subtotal</i>		1	1	5
TOTAL		74	74	61
Porcentaje ponderado	100%	66%	65%	54%

Como se observa en el Cuadro 121, según el AMC realizado, la tecnología de tratamiento secundario óptima para ser implementada en la PTAR Los Tajos, corresponde a LAC, pues cuenta con el más alto porcentaje ponderado a nivel integral, de 66%. Además, es la mejor tecnología en los criterios económico-financiero y ambiental. La tecnología de IFAS parece ser la mejor alternativa a nivel técnico, y la de MBR a nivel social, por su posibilidad de reúso.

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y **RECOMENDACIONES**

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

1. El prediseño del tratamiento secundario mediante la tecnología de Lodos Activados Convencionales (LAC) para la PTAR Los Tajos, fue realizado por la empresa española Acciona Agua S.A.U. Al compararlo con la metodología descrita por Sperling (2007), el parámetro de sólidos suspendidos del licor de mezcla (SSLM) no se ajusta al resultado del dimensionamiento de los reactores biológicos propuesto. El tiempo de retención hidráulico (TRH) de 3,41 h (etapa intermedia) y 3,21 h (etapa II), se encuentra muy por debajo del rango típico recomendado por expertos para esta tecnología (6 h a 8 h), lo que podría implicar rápidos tiempos de contacto y dificultades para alcanzar las eficiencias esperadas. Para el dimensionamiento de los sedimentadores secundarios, la empresa seleccionó tasas de carga hidráulica (TRH) y de sólido (TRS) menores a los rangos típicos, lo que implica que fueron conservadores, obteniéndose áreas de sedimentación mayores. Los demás parámetros de diseño si se encuentran dentro de los valores típicos indicados en la literatura citada.
2. El tratamiento secundario prediseñado mediante la tecnología de Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS) para la PTAR Los Tajos, consta de 9 trenes para la etapa intermedia y 13 trenes en total para la etapa II, con una capacidad de tratamiento de 30.000 m³/d cada uno, conformado por una sección inicial (tanque IFAS) de 20 m de largo y 8 m ancho con biosoportos móviles de PEAD (tipo Active Cell 920 ® de la empresa *Heaworks Bio Inc.*) y una segunda sección sin biosoportos (tanque LAC) de 12 m de largo y 8 m de ancho. Ambas secciones con una profundidad útil de 7 m. Posteriormente, para la etapa de clarificación, se proponen 8 sedimentadores (etapa intermedia) y 4 adicionales (etapa II) de 46 m de diámetro.
3. El prediseño del tratamiento secundario para la PTAR Los Tajos mediante la tecnología de Biorreactores de Membrana (MBR), se realizó con la configuración de MBR sumergido-externo, que consta de una sección inicial de tratamiento biológico con 4 trenes (etapa intermedia) y 2 trenes adicionales (etapa II), seguidos de una sección con 12 tanques de membranas sumergidas para la etapa intermedia y 6 tanques de membranas adicionales para la etapa II. Cada tren del tratamiento biológico se conforma de 4 tanques con dimensiones de 36,6 m de largo, 27,4 m de ancho y 6,1 m de altura útil. Cada tanque de membranas tiene dimensiones de 23,5 m de largo, 4,1 m de ancho y 2,5 m de profundidad útil. Las membranas se proponen de tipo fibra hueca de PVDF, modelo B40N de la empresa *Evoqua Water Technologies*.
4. La tecnología de LAC cuenta con los menores costos de inversión inicial y de O&M, en

comparación con las tecnologías de IFAS y MBR. El resultado del análisis financiero mediante el método de Valor Actual de Costos (VAC) para las tres tecnologías, indica que la tecnología LAC es la más rentable, con un valor de -US\$124,14 millones, seguida de la tecnología IFAS con un VAC de -US\$152,92 millones y finalmente, la tecnología MBR con un VAC de -US\$231,18 millones.

5. El análisis multicriterio, utilizado como instrumento metodológico para la comparación integral de los aspectos: técnicos, económicos, ambientales y sociales más relevantes de las tres tecnologías analizadas (LAC, IFAS y MBR); da como resultado un porcentaje ponderado de 66% para la tecnología de LAC, la tecnología de IFAS dista en poca magnitud con 65%, y 54% para la tecnología de MBR. Ante estos resultados, se concluye que la mejor opción de tecnología a implementar para el tratamiento secundario de la PTAR Los Tajos es LAC. Sin embargo, debido a la cercana diferencia entre los porcentajes ponderados de las tecnologías de LAC e IFAS (1%), y conociendo que la tecnología de IFAS es utilizada comúnmente para ampliar la capacidad de tratamiento en PTARs de lodos activados existentes (incorporando los biosoportes al tratamiento biológico, modificando levemente la infraestructura disponible y las necesidades de aireación), se debe realizar un estudio adicional, donde se implemente la tecnología de LAC en la etapa intermedia transformándose en la tecnología de IFAS en la etapa II. Siendo factible esta propuesta, el diseño y la construcción de la etapa intermedia mediante LAC, deberá contemplar desde el inicio, la futura ampliación mediante IFAS, tomando en cuenta aspectos hidráulicos, sanitarios, estructurales y electro-mecánicos, considerando unidades modulares y dejando las previstas necesarias para el cambio de tecnología de tratamiento secundario en la PTAR.

8.2. Recomendaciones

1. Se recomienda para el diseño final de la etapa intermedia y la etapa II de la PTAR Los Tajos, que se realicen los cálculos a partir de los datos actualizados del afluente de la PTAR, considerando tanto los datos de la época seca como la lluviosa, los cuales son monitoreados por el Laboratorio de Aguas Residuales de la PTAR Los Tajos.

2. Actualmente, el espacio disponible en los terrenos Los Tajos no es una limitante para la implementación de la etapa intermedia y la etapa II de la PTAR. Es muy importante que previo a la selección de la tecnología de tratamiento secundario a implementar, se conozca si es factible (política y económicamente) incrementar a futuro (posterior a la etapa II) la capacidad de la PTAR, adicionando nuevas secciones de redes de alcantarillado sanitario, no proyectadas inicialmente

para este proyecto, pues para ello deberá preverse la posibilidad de incorporar nuevas unidades de tratamiento (modulares), según la disponibilidad de terreno en Los Tajos, lo que va de la mano con una adecuada planificación de los proyectos de desarrollo urbano del Gran Área Metropolitana.

3. El proyecto de la PTAR Los Tajos (en su etapa intermedia y etapa II), al ser de gran escala requiere una gran labor social en la población de la ciudad de San José (por ser los usuarios directos del sistema), no sólo del sector residencial, sino también comercial e industrial, donde sea posible erradicar las malas prácticas y hábitos indeseados en el tema de manejo de aguas residuales, tales como el vertido de residuos sólidos en los servicios sanitarios (juguetes, toallas sanitarias, condones, pañales, restos de materiales de construcción y otros) o de contaminantes líquidos en exceso por las pilas y lavatorios (aceites, pinturas, químicos fuertes, entre otros) y la conexión ilegal de aguas pluviales a la red de alcantarillado sanitario. Estas malas prácticas se encuentran culturalmente arraigadas en gran parte de la población costarricense, y perjudican, entorpecen y dificultan las labores de recolección y tratamiento de las aguas residuales municipales. Se debe diseñar y planificar campañas de educación y sensibilización a la población cubierta por el alcantarillado sanitario de la ciudad de San José, de todas las edades y todos los niveles socioeconómicos, para poder reducir los múltiples problemas que se tendrían que solucionar por altas cargas orgánicas en el agua residual cruda que ingresaría a la PTAR, y también por los altos picos de caudal que se presentan en época lluviosa debido a las conexiones ilícitas del alcantarillado sanitario.

4. Es importante que se destinen recursos, tanto humanos como económicos, a nivel interinstitucional (AyA en conjunto con el Ministerio de Salud y Municipalidad según el caso) para realizar campañas de control de entes generadores de aguas residuales, y programas para localización y detección de conexiones ilícitas al alcantarillado sanitario, de manera que puedan llegar a controlarse las sobrecargas hidráulicas y orgánicas que llegan a la PTAR Los Tajos según las diferentes épocas del año.

5. La selección de todos los equipos mecánicos a colocar en la PTAR Los Tajos (especialmente los sopladores y las bombas), debe evaluar las ventajas y las desventajas particulares de cada equipo, pues la variedad de productos presentes en el mercado requiere que sean analizadas a detalle, con criterio técnico especializado. Se deben tomar en cuenta aspectos técnicos y económicos de los equipos como: costos iniciales, consumo energético, tipo de tecnología, requerimientos específicos de mantenimiento (lubricación, repuestos, control térmico o de calidad del aire, etc.); además, considerar aspectos como: casa fabricante, país de procedencia, marca, modelo, garantías, acompañamiento en la instalación, asesoramiento técnico durante su vida útil,

entre otros aspectos.

6. Indistintamente del tipo de tecnología a implementar para el tratamiento secundario de la PTAR, es importante considerar una redundancia del 50% en el equipo mecánico de las operaciones más importantes (rejillas finas, sopladores, bombas de recirculación, bombas de purga de lodos) contando con un juego completo de equipo adicional por cada componente (“*set*” de emergencia).

REFERENCIAS

REFERENCIAS

Acciona Agua S.A.U. 2010. *Diseños Finales, Construcción, Equipamiento, Pruebas, Puesta en servicio y transferencia tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Los Tajos”*. Oferta técnica de la Licitación Pública Internacional N° 2008LI-00002-PRI del AyA.

Albadalejo, A.; Martínez, J.L. y Santos, J.M. 2015. Parametrización del consumo energético en las depuradoras de aguas residuales urbanas de la Comunidad Valenciana. *Revista TecnoAqua [Online]* N° 11, Enero - Febrero 2015. España pp. 55-61. Disponible en: <https://www.tecnoaqua.es/media/uploads/noticias/documentos/articulo-tecnico-parametrizacion-consumo-energetico-depuradoras-agua-residuales-urbanas-comunidad-valenciana-tecnoaqua-es.pdf> (accesado el 3 de julio, 2017).

American Water Works Association (AWWA) Research Foundation, Lyonnaise des Eaux, Water Research Commission of South Africa. 1998. *Tratamiento del agua por procesos de membrana. Principios, procesos y aplicaciones*. García, A., McGraw-Hill/Interamericana de España, S.A.U: Impreso en México.

Angappan, S. 2014. *Innovative Applications of MBBR/IFAS Technologies*. Presentación realizada el viernes 7 de noviembre de 2014, durante la gira técnica a la PTAR El Roble, Puntarenas, Costa Rica.

Angappan, S. 2016. *IFAS Costa Rica: Changes in the proposal*. Headworks Bio Inc. [Correo electrónico enviado el 29 de enero de 2016].

Angulo, F. 2015. *Gestión del recurso hídrico y saneamiento en Costa Rica*. Vigésimoprimer Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible. Estado de la Nación, San José, Costa Rica.

Araya, Á. 2014. *Opción tecnológica para la ampliación de la capacidad de tratamiento de la PTAR Los Tajos*. Presentación Transferencia de Experiencias Internacionales del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, San José, Costa Rica.

Araya, Á. 2015. *Unidad Ejecutora AyA-JBIC y antecedentes de la PTAR Los Tajos* [entrevista personal en Pavas, San José] (15 de mayo del 2015).

Arévalo, J. *Aplicación de Biorreactores de Membrana al Agua Residual Urbana: Consideraciones para la modificación de los parámetros de proceso*. Tesis para optar por el grado de Doctor en el

Departamento de Ingeniería Civil. Editorial de la Universidad de Granada, España, 2011.

Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica. 2006. Ley N°8559 *Aprobación del Contrato de Préstamo Externo N° CR-P4, suscrito por el gobierno de la República de Costa Rica y el Banco Japonés para la Cooperación Internacional (JBIC), para financiar el proyecto de Mejoramiento del Medio Ambiente del Área Metropolitana de San José*. Publicada en la Gaceta N°226 del 24 de noviembre del 2006.

Asano, T.; Burton, F.; Leverenz, H.; Tsuchihashi, R.; Tchobanoglous, G. 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies and Applications*. Metcalf & Eddy, Inc. an AECOM Company. McGraw-Hill: New York, Chicago, San Francisco, Lisbon, London, Madrid, Mexico City, Milan, New Delhi, San Juan, Seoul, Singapore, Sydney, Toronto. ISBN: 9780071459273.

Asistencia Sanitaria Económica para Empleados y Obreros (ASEPEYO). 2009. *Análisis de los riesgos existentes en las actividades de saneamiento público y elaboración de buenas prácticas preventivas. Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)*. Disponible en: [http://extranet.asepeyo.es/apr/Apr0301.nsf/ficheros/HAQ0905026%20An%C3%A1lisis%20de%20los%20riesgos%20existentes%20en%20las%20actividades%20de%20saneamiento%20p%C3%BAblico%20y%20elaboraci%C3%B3n%20de%20buenas%20pr%C3%A1cticas%20EDAR.pdf/\\$file/HAQ0905026%20An%C3%A1lisis%20de%20los%20riesgos%20existentes%20en%20las%20actividades%20de%20saneamiento%20p%C3%BAblico%20y%20elaboraci%C3%B3n%20de%20buenas%20pr%C3%A1cticas%20EDAR.pdf](http://extranet.asepeyo.es/apr/Apr0301.nsf/ficheros/HAQ0905026%20An%C3%A1lisis%20de%20los%20riesgos%20existentes%20en%20las%20actividades%20de%20saneamiento%20p%C3%BAblico%20y%20elaboraci%C3%B3n%20de%20buenas%20pr%C3%A1cticas%20EDAR.pdf/$file/HAQ0905026%20An%C3%A1lisis%20de%20los%20riesgos%20existentes%20en%20las%20actividades%20de%20saneamiento%20p%C3%BAblico%20y%20elaboraci%C3%B3n%20de%20buenas%20pr%C3%A1cticas%20EDAR.pdf) (accesado el 21 de junio del 2017).

Avendaño, M. 2015. Nueva planta permitirá tratar aguas negras de 245.000 clientes del AyA. *La Nación*, 10 de setiembre del 2015. Disponible en: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/nueva-planta-permitira-tratar-aguas-negras-de-245-000-clientes-del-aya/HYT7TP7GSZDETG5LARGPK2A2WY/story/> (accesado el 30 de setiembre del 2015).

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2017a. *Índice de Precios al Consumidor (IPC)*. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%209> (accesado el 16 de agosto del 2017).

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2017b. *Índices de Precios al Productor Industrial (IPPI) con combustible*. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20599#Notas599> (accesado el 16 de agosto del 2017).

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2017c. *Tipo de cambio de compra y de venta del dólar de*

los Estados Unidos de América en colones costarricenses. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20400> (accesado el 13 de julio del 2017).

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2017d. *Índice de precios al productor de la manufactura, por producto (CCP) para el componente: otros productos químicos*. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%202529> (accesado el 12 de agosto del 2017).

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2017e. *Índice de Precios al Productor de Servicios (IPP-S) por servicio, Clasificación Central de Productos (CCP) nivel 691: Electricidad*. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20366> (accesado el 12 de agosto del 2017).

Banco Central de Costa Rica (BCCR). 2017f. *Índice de Salarios Mínimos Nominales (ISMN)*. Disponible en: <http://indicadoreseconomicos.bccr.fi.cr/indicadoreseconomicos/Cuadros/frmVerCatCuadro.aspx?idioma=1&CodCuadro=%20295> (accesado el 12 de agosto del 2017).

Barboza, R. 2014. *Presentación y Gira Técnica durante la construcción de la PTAR Los Tajos* [entrevista personal en la Uruca, San José] (19 de febrero del 2014).

Bentem, A.G.N. Van; Petri, C.P.; Schyns, P.F.T.; Roest, H.F. Van der. 2007. *Membrane Bioreactors: Operation and Results of a MBR Wastewater Treatment Plant*. STOWA: IWA Publishing: Londres, Inglaterra, ISBN: 1843391732.

Brenes, F. 2009. Proyecto Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José, Contrato de Préstamo CR-P4. *Revista Hidrogénesis*, 7, 2: 59- 64.

Brentwood Industries (Editor). 2009. *Integrated Fixed Film/ Activated Sludge (IFAS) Technology*. Reading: Brentwood Industries, Inc. Disponible en: http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/BRENTWOOD%202009%20IFAS%20Technology.pdf (accesado el 16 de octubre del 2014).

Brentwood Industries, Inc. 2015. *Brentwood's fixed-film systems*. Disponible en: <http://www.brentwoodindustries.com/products/biological-treatment/accufas/applications.php> (accesado el 26 de marzo del 2015).

Brepols, C. 2011. *Operating Large Scale Membrane Bioreactors for Municipal Wastewater*

Treatment; IWA Publishing: Londres, Inglaterra. ISBN: 1843393050.

Briceño, N. 2016. *Fundamentos para el manejo de aguas residuales*. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados. San José, Costa Rica.

Bruce, A. 2016. *Which is the greenest, happiest country in the world?* World Economic Forum (WEFORUM). Disponible en: <https://www.weforum.org/agenda/2016/07/greenest-happiest-country-in-the-world/> (accesado el 13 de agosto del 2016).

Buer, T.; Cumin, J. 2009. *MBR module design and operation*. Desalination 250 (2010) pp. 1073–1077. Elsevier B.V.

Centeno, E. 2011. *Análisis comparativo de distintas tecnologías de tratamiento de aguas residuales para municipalidades de Costa Rica*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización Mundial de la Salud (OMS). 1991. *Manual de disposición de Aguas Residuales. Origen, Descarga, Tratamiento y Análisis de las Aguas Residuales*. CEPIS: Lima Perú, Tomo I y II.

Chavarría, L. 2016. Centroamérica luchando por aguas negras mejor tratadas. *Revista Construir [Online]*, 31 de marzo 2016. Disponible en: <http://revistaconstruir.com/luchando-aguas-negras-mejor-tratadas/> (accesada el 4 de setiembre del 2016).

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2016. *Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) Tomo 35: Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Procesos avanzados con fines de reúso*. Coyoacán, México.

Confederación Hidrográfica del Duero (CHD). 2013. *Guía práctica para la depuración de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. Disponible en: <http://www.chduero.es/Inicio/Gesti%C3%B3ndelaCuenca/Vertidosydepuraci%C3%B3n/Saneamientoydepuraci%C3%B3naguasresiduales/Depuraci%C3%B3nvertidosenpeque%C3%B1aspoblaciones/tabid/573/Default.aspx> (accesada el 10 de setiembre del 2016).

Davis, J.; Harrison, K.; Shields B. 2009. Compact Technology: Increasing Treatment Capacity Without Building More Basins. *Florida Water Resources Journal [Online]*, Julio 2009. p. 24-29.

Disponible en: <https://www.fwrj.com/techarticles/0709%20tech2.pdf> (accesado el 7 de agosto del 2015).

DeCarolís, J.; Adham, S.; Pearce, W.; Hirani, Z.; Lacy, S. y Stephenson, R. 2007. *Cost trends of MBR systems for municipal wastewater treatment*. Conferencia de la Water Environment Federation (WEFTEC): (3407-3418) Sesión del 26 al 30 de setiembre del 2007. California, EE.UU.

Decreto Ejecutivo N° 32133 MINAE-S. *Declara de interés público y necesidad social el diseño, financiamiento, ejecución, operación y mantenimiento de obras para la recolección, tratamiento y disposición final de aguas residuales, generados en centros urbanos*. Publicada en la Gaceta N°239 del 07 de diciembre del 2004.

Decreto Ejecutivo N°33601 MINAE-S. *Reglamento de Vertido y Reúso de Aguas Residuales*. Publicado en la Gaceta N° 55 del 19 de marzo del 2007.

Decreto Ejecutivo N° 34431 MINAE-S. *Reglamento del Canon Ambiental por Vertidos*. Publicado en la Gaceta N° 74 del 17 de abril del 2008.

Equipo SAPROF. 2004. *Estudios de asistencia especial para la formación de proyectos (SAPROF) del Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José en la República de Costa Rica, para el Banco del Japón para la Cooperación Internacional (JBIC)*. San José, Costa Rica.

European Commission. 2001. *Extensive wastewater treatment processes adapted to small and medium sized communities*. International Office for Water. Luxembourg. Disponible en: http://ec.europa.eu/environment/water/water-urbanwaste/info/pdf/waterguide_en.pdf (accesado el 5 de noviembre del 2016).

Evoqua. 2015. *Membrane Bioreactor System - MEMPULSE® MBR*. Disponible en: <http://www.evoqua.com/en/brands/Memcor/Pages/mempulse-mbr.aspx> (accesado el 6 de noviembre del 2015).

Evoqua. 2016a. *Budgetary Proposal N° 16P1667MBR para la etapa intermedia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Los Tajos*. Enviada el 17 de febrero del 2016. Pittsburgh, EE.UU.

Evoqua. 2016b. *Budgetary Proposal N° 16P1667 RI MBR para la etapa II de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR) Los Tajos*. Enviada el 08 de abril del 2016. Pittsburgh,

EE.UU.

Evoqua. 2016c. *PTAR Los Tajos Membrane Bioreactor Energy Consumption*. Enviada el 23 de febrero del 2016. Pittsburgh, EE.UU.

Evoqua. 2016d. *PTAR Los Tajos Membrane Operating System Chemical Consumption*. Enviada el 23 de febrero del 2016. Pittsburgh, EE.UU.

Fernández, E. 2014. Proyecto para tratamiento de aguas de la GAM ya comprometió 29% de inversión. *El Financiero*, 5 enero del 2014. Disponible en: http://www.elfinancierocr.com/economia-y-politica/Mejoramiento_Ambiental-GAM-AyA-planta_de_tratamiento_0_439756042.html (accesado el 10 de abril del 2014).

Fundación Centro Canario del Agua. 2003. *Introducción a los Bioreactores de Membranas*. Islas Canarias, España.

Gardner Denver. 2016a. *Cotización de los sopladores de los biorreactores IFAS (marca Hoffman Lamson, Multi-Stage Centrifugal Series Blower; Model 2405) para la PTAR Los Tajos*. Enviada el 03 de marzo del 2016 por Márcio Mendes Garcia, Campinas, Brasil.

Gardner Denver. 2016b. *Cotización de los sopladores de los biorreactores LAC de la tecnología IFAS (Soplador de desplazamiento positivo, tubular; modelo CycloBlower 11CDL31) para la PTAR Los Tajos*. Enviada el 07 de marzo del 2016 por Martin Fonseca, San José, Costa Rica.

Grajales, A.; Serrano, E.; Hahn, C. 2013. Los métodos y procesos multicriterio para la evaluación. *Revista Luna Azul [Online]*. 36: 285-306. Universidad de Caldas. Colombia. ISSN 1909-2474. Disponible en: http://200.21.104.25/lunazul/downloads/Lunazul36_14.pdf (accesado el 20 de junio del 2017).

Hai, F.I.; Yamamoto, K.; Lee, C.-H. 2014. Eds. *Membrane Biological Reactors: Theory, Modeling, Design, Management and Applications to Wastewater Reuse*; IWA Publishing: Londres, Inglaterra. ISBN: 9781780401331.

Haandel, A.C. van; Lubbe, J.G.M. van der. 2012. *Handbook of Biological Wastewater Treatment: Design and Optimisation of Activated Sludge Systems*. Second Edition. IWA Publishing: London. IBN 9781780400808.

Headworks Bio Inc. 2014a. *Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) Process*. Disponible en: <http://www.headworksiinternational.com/biological-wastewater-treatment/IFAS.aspx>

(accesado el 6 de abril del 2014).

Headworks Bio Inc. 2014b. Productos de Direct Industry, *Planta de Tratamiento de Lodos Activados Active Cell™*. Disponible en: http://www.directindustry.es/prod/headworks-bio-inc/product-90397-1097239.html#product-item_1097225 (accesado el 6 de abril del 2014).

Headworks Bio Inc. 2016. *Cotización del Sistema IFAS para la PTAR Los Tajos "IFAS Costa Rica - Change in the proposal"*. 29 de enero del 2016.

Hernández, A. 1996. *Depuración de Aguas Residuales*. Tercera Edición, Segunda Impresión, PARANINFO S.A.: Madrid.

Hidrotica. 2016. *Cotización de las bombas para recirculación y purga de lodos (marca Sulzer) de la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos*. Enviada el 02 de marzo del 2016 por Hugo Jara Tenorio, San José, Costa Rica.

Huertas, G. y Sauma, P. 2015. *Indicadores internacionales de desarrollo: seguimiento e interpretación para Costa Rica, Índice de Desempeño Ambiental*. Observatorio del Desarrollo (OdD) de la Universidad de Costa Rica (UCR). San José, Costa Rica. Disponible en: http://www.odd.ucr.ac.cr/sites/default/files/indicadores_internacionales_de_desarrollo/2015/application/pdf/serie_iid_04_epi.pdf (accesado el 18 de enero del 2017).

Iagua. 2012. Acciona construirá y operará la mayor planta de tratamiento de aguas residuales de Costa Rica. *Noticias iAgua.es*, 13 de setiembre del 2012. <http://www.iagua.es/noticias/acciona/12/09/13/acciona-construira-y-operara-la-mayor-planta-de-tratamiento-de-aguas-residuales-de-costa-rica-20963> (accesado el 10 del abril del 2014).

Iglesias, R. 2014. *Biorreactores de membrana para la depuración y reutilización de aguas residuales urbanas*. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas): España.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA); Organización Panamericana de la Salud (OPS) de la Organización Mundial de la Salud (OMS). 2002. *Análisis sectorial de agua potable y saneamiento en Costa Rica*. Segundo Proyecto de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario de Costa Rica, co-financiado por el Banco Mundial (BIRF). Disponible en: <https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/An%C3%A1lisis%20sectorial%20agua%20potable%20y%20saneamiento%20de%20Costa%20Rica%20Informe%20final%202002.pdf> (accesado el 17 de

junio del 2017).

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2006a. Acuerdo de Junta Directiva N° 2006-512, 11 de setiembre del 2006. *Compromiso Institucional para gestionar las subsiguientes etapas del proyecto de alcantarillado sanitario del área metropolitana*. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2006b. Acuerdo de Junta Directiva N° 2006-587, 19 de octubre del 2006. *Normas técnicas y características del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales (Etapa I). Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José*. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2010. *Licitación Pública Internacional No. 2008LI-00002-PRI “Diseños Finales, Construcción, Equipamiento, Pruebas, Puesta en Servicio y Transferencia Tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “Los Tajos” Especificaciones Técnicas de obras para diseños finales, construcción, equipamiento, pruebas, puesta en servicio, transferencia tecnológica y asistencia en la operación de la PTAR del Área Metropolitana, San José*. Oferta Técnica, Volumen IV. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2011. Acuerdo de Junta Directiva N° 2011-034, 21 de junio del 2011. *Readjudicación de la Licitación Pública Internacional 2008LI-000002-PRI “Diseños finales, Construcción, Equipamiento, Pruebas, Puesta en servicio y transferencia tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos”*. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2012. *Firma de contrato para diseños finales, construcción, equipamiento, pruebas, puesta en servicio y transferencia tecnológica de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Los Tajos*. Comunicado de Prensa. Disponible en: http://mejoramientoambiental.com/wp-content/uploads/2011/01/05_NOTICIAS_comunicado_prensa_ptar.pdf (accesado el 10 de abril, 2014).

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2013. Acuerdo de Junta Directiva N° 2013-060, 19 de noviembre del 2013. *Licitación Pública Nacional 2013LN-00020-PRI "Suministro, Instalación y Puesta en Marcha de Modificaciones en dos Plantas de Tratamiento El Roble de Puntarenas y San Isidro de Pérez Zeledón" Memorando SGG-2013-1015*. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2014. *Proyecto de Mejoramiento Ambiental del Área Metropolitana de San José (PMAAMSJ)*. Disponible en: <http://www.mejoramientoambiental.com/> (accesado el 10 de abril, 2014).

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2015. Acuerdo de Junta Directiva N° 2015-548, 15 de diciembre del 2015. *Constitución de la Unidad Ejecutora del Programa de Agua Potable y Saneamiento (UE-PAPS)*. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2016a. *Justificación técnica para la integración de la Quinta Etapa del Acueducto Metropolitano AyA (Orosi 2)*. Setiembre 2016. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2016b. *Manual Descriptivo de Clases Institucionales del AyA*. Mayo 2016. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2016c. *Información de Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) operadas por el AyA con tecnología de Lodos Activados e IFAS (Sistemas Periféricos y GAM)*. Marzo 2016. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2017a. *Índice Salarial I Semestre 2017*. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2017b. *Caracterización de la Subgerencia Gestión de Sistemas GAM*. Mayo 2017. San José, Costa Rica.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). 2017. *Tarifas de cobro de la energía eléctrica para los usuarios del ICE y la CNFL*. Publicado en La Gaceta No.120 Alcance No.152 del 26 de junio 2017.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2009. *Operación y Mantenimiento de Plantas de Tratamiento de Lodos Activados*. México.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2017. *Índice de Precios del Sector Construcción para edificaciones*. Disponible en: <http://www.inec.go.cr/economia/indice-de-precios-de-la-construccion> (accesado el 31 de agosto del 2017).

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT) del Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España. 1998. *Notas Técnicas de Prevención (NTP) 473: Estaciones depuradoras de aguas residuales: riesgo biológico*. Disponible en:

http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_473.pdf (accesado el 21 de junio del 2017).

Jiménez, O. 2012. Revisión de los límites de DBO y SST especificados para el agua tratada de la primera etapa de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales, Los Tajos. *Revista Hidrogénesis*, 10, 1: 65- 71.

Jördening, H.J., Winter, J. 2005. Eds. Chapter 3: Activated Sludge Process. *Environmental Biotechnology: Concepts and Applications*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. John Wiley & Sons: Weinheim.

Judd, S. 2006. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment [E-Book]*. Elsevier. Disponible en: <http://ebookbrowse.net/mbr-book-pdf-d318465367> (accesado el 12 de octubre del 2014).

Judd, S. 2011. *The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors for Water and Wastewater Treatment*. Second Ed. Elsevier. Oxford, Inglaterra.

Kubota España. 2017. *Soluciones de membrana*. Disponible en: <http://www.kubota-global.net/es/products/solutions/> (accesado el 13 de enero del 2017).

Lazo, A. 2016. *Cambio de tecnología de LAC a IFAS en la PTAR El Roble de Puntarenas* [entrevista personal en Pavas, San José] (1 de julio del 2016).

Lazo, A. y Araya, Á. 2015. Aplicación de la tecnología “lodo activado integrado con biopelícula fija” en plantas de tratamiento de aguas residuales tipo lodos activados. *Revista Hidrogénesis*, 11, 1: 83- 96.

Longo, S.; Mirko, B.; Bongards, M.; Chaparro, A.; Cronrath, A.; Fatone, F.; Lema, J.; Iglesias, M.; Soares, A.; Hospido, A. 2016. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. *Applied Energy [Online]*, 179, 1251-1268.

Malgarejo, J. 2009. Efectos ambientales y económicos de la reutilización del agua en España. España: Universidad de Alicante. *Clm economía: Revista Económica de Castilla-La Mancha*. N° 15, pp. 245-270. Disponible en: http://www.clmeconomia.jccm.es/pdfclm/malgarejo_clm_15.pdf (accesado el 16 de junio del 2017).

Mata, E. 2008. *Tema 3: Análisis de inversiones y evaluación de alternativas*. Clase N°11. Notas del Curso Administración de la Construcción IC- 0811. Escuela de Ingeniería Civil de la

Universidad de Costa Rica. II Semestre del 2008.

Melin, T.; Jefferson, B; Bixio, D.; Thoeye, C.; De Wilde, W.; De Koning, J.; Van der Graaf, J.; Wintgens, T. 2005. *Membrane Bioreactor Technology for Wastewater Treatment and Reuse*, Intl. Conference “Integrated Concepts in Water Recycling”, Wollongong, NSW, Australia, 14-17 Febrero, 2005. ISBN 1 74128 082 6.

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). 2015. *VII Plan Nacional de Energía (2015-2030)*. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, 1 ed., San José, C.R. Disponible en: <http://www.minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf> (accesado el 3 de julio del 2017).

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Salud (MS), Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA). 2016. *Política Nacional de Saneamiento en Aguas Residuales (PNSAR) 2016-2045*. Primera edición. San José, Costa Rica, octubre 2016. Disponible en:

<https://www.aya.go.cr/Noticias/Documents/Politica%20Nacional%20de%20Saneamiento%20en%20Aguas%20Residuales%20marzo%202017.pdf> (accesado el 30 de marzo del 2017).

Mittal, A. 2011. Biological Wastewater Treatment (Fulltide). *Water Today* [Online]. August 2011, pp. 32-44. Disponible en: https://www.academia.edu/7451295/Biological_Wastewater_Treatment (accesado el 10 de julio del 2016).

Moreno, J.M., Aguarón, J. y Escobar, M.T. 2001. Metodología científica en valoración y selección ambiental. *Pesquisa Operacional* [Online], 21, 1: 1-16.

Núñez, S. 2017. *Demanda y producción de agua potable para la GAM, presentación por parte del Subgerente de Sistemas GAM* [entrevista telefónica y videoconferencia] (28 de junio del 2017).

Ordoñez, K. 2016. *Consulta sobre cantidad de personal al modificar la tecnología de LAC a IFAS* [correo electrónico]. (Comunicación por correo electrónico, 13 de junio del 2016).

Órgano de Normalización Técnica del Ministerio de Hacienda. 2014. *Mapa de Valores de Terrenos por Zonas Homogéneas del Cantón de San José*. Plataforma de Valores de la Municipalidad de San José, Costa Rica.

Ortegón, E., Pacheco, J.F.; Roura, H. 2005. *Metodología General de Identificación, Preparación y Evaluación de Proyectos de inversión pública*. CEPAL. Santiago, Chile.

Pehrson, R. y McDowell, C. 2002. *Integrated Fixed-Film Activated Sludge (IFAS) Technology For WWTP Upgrades*. Conference Proceedings of the Water Environment Federation (WEFTEC): Session 51 through Session 60, pp. 387-398(12).

Pérez, J.A. 2009. *Olores en instalaciones de depuración de aguas residuales*. Jornada Control y Solución a la Contaminación Ambiental por Olores. Canal de Isabel II. Madrid, España. <http://www.camaramadrid.es/doc/linkext/caso-practico-3-jornadas-olores-cyii.pdf> (accesado el 2 de diciembre del 2016).

Presidencia de la República. 2016a. *Costa Rica recupera 12 puestos en índice ambiental de Yale*. <http://presidencia.go.cr/comunicados/2016/02/costa-rica-recupera-12-puestos-en-indice-ambiental-de-yale/> (accesado el 13 de agosto del 2016).

Presidencia de la República. 2016b. *Planta de Tratamiento Los Tajos genera beneficios adicionales al saneamiento*. <http://presidencia.go.cr/comunicados/2016/03/planta-de-tratamiento-los-tajos-genera-beneficios-adicionales-al-saneamiento/> (accesado el 13 de agosto del 2016).

Procesos Auto-Mecanizados (PAM). 2015. *Cotización de las rasquetas barrelos de los sedimentadores secundarios de la tecnología IFAS (Equipamiento Decantador Circular- PAM DC) para la PTAR Los Tajos*. Enviada el 02 de diciembre del 2015 por Flavio Huser, Alicante, España.

Procesos Auto-Mecanizados (PAM). 2016. *Cotización de los tamices rotatorios para el pretratamiento de la tecnología MBR (Modelo Tandem) para la PTAR Los Tajos*. Enviada el 18 de marzo del 2016 por Flavio Huser, Alicante, España.

Radjenović, J.; Matošić, M.; Mijatović, I.; Petrović, M.; Barceló, D. 2008. Membrane Bioreactor (MBR) as an Advanced Wastewater Treatment Technology. *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste*. The Handbook of Environmental Chemistry, Vol. 5S/2, pp. 37–101. Springer, Berlin, Heidelberg.

Ravagnan S.p.A. 2016. *Planta de microfiltración y de ultrafiltración*. Disponible en: <http://www.ravagnan.com/es/divisi%C3%B3n-de-plantas/plantas-para-el-tratamiento-del-agua/planta-de-microfiltracion-y-de-ultrafiltracion.html> (accesado el 10 de junio del 2016)

Sala Constitucional. Resolución Voto 13029-06. 2006 *Contaminación del Río Virilla por aguas negras. Protección del recurso hídrico*. Setiembre 2006. San José, Costa Rica. Disponible en: <http://esdocs.org/docs/index-4843.html?page=61> (accesado el 6 de abril del 2014).

Servicios y Tratamientos Químicos T.Q. S.A. (SERQUIMSA). 2016. *Cotización de los productos*

químicos (para el lavado de membranas) de la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos. Enviada el 01 de marzo del 2016 por Randall Quesada Duran, San José, Costa Rica.

Silva, J.; Torres, P.; Madera, C. 2008. Reúso de aguas residuales domésticas en agricultura: una revisión. *Agronomía Colombiana [Online]*, 26, 2: 347-359.

Solano, R. 2014. *Fotografías IFAS.* Gira técnica realizada a la PTAR El Roble, Puntarenas, el viernes 7 de noviembre del 2014.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2014a. *Suministro, instalación y puesta en marcha de modificaciones en dos plantas de tratamiento existentes: El Roble de Puntarenas y San Isidro de Pérez Zeledón. Posición #1. IFAS El Roble.* Oferta técnica de la Licitación Pública Nacional N° 2013LN-000020-PRI del AyA.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2014b. *Manual de operación y mantenimiento Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Roble, Puntarenas.* San José, Costa Rica.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2015a. *Cotización de la construcción de la obra civil de los reactores biológicos de la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos.* Enviada el 21 de setiembre del 2015 por Rodolfo González, San José, Costa Rica.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2015b. *Cotización de la construcción de la obra civil de los sedimentadores secundarios de la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos.* Enviada el 06 de noviembre del 2015 por Rodolfo González, San José, Costa Rica.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2015c. *Cotización de los difusores de burbuja fina para los biorreactores LAC (marca SAM HWAN modelo SH500 MDD) para la PTAR Los Tajos.* Enviada el 03 de diciembre del 2015 por Rodolfo González, San José, Costa Rica.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2016a. *Cotización de la construcción de la obra civil del edificio de sopladores (y la grúa viajera) de la tecnología IFAS para la PTAR Los Tajos.* Enviada el 15 de abril del 2015 por Rodolfo González, San José, Costa Rica.

Soluciones Técnicas Ambientales S.A. (SOLAMSA). 2016b. *Cotización de la construcción de la obra civil de: los reactores biológicos, reactores de membranas, edificio de sopladores del sistema biológico y edificios complementarios de la tecnología MBR para la PTAR Los Tajos.* Enviada el 15 de abril del 2015 por Rodolfo González, San José, Costa Rica.

Sperling, M. V. 2007. *Biological Wastewater Treatment Series, Volume 1: Wastewater characteristics, Treatment and Disposal*. Department of Sanitary and Environmental Engineering Federal University of Minas Gerais, Brazil. IWA Publishing: London. ISBN: 1 84339 161 9.

Sperling, M. V. 2007. *Biological Wastewater Treatment Series, Volume 5: Activated Sludge and Aerobic Biofilm Reactors*. Department of Sanitary and Environmental Engineering Federal University of Minas Gerais, Brazil. IWA Publishing: London. ISBN: 1 84339 165 1.

Tao, X.; Chenfwen, W. 2012. *Energy Consumption in Wastewater Treatment Plants in China*. IWA world congress on water, climate energy; Copenhagen, Denmark, October 29–31. Disponible en: https://keynote.conference-services.net/resources/444/2653/pdf/IWAWCE2012_0221.pdf (accesado el 3 de julio del 2017).

Tchobanoglous, G.; Burton, F.; Stensel, H.D. 2004. *Wastewater Engineering, Treatment and Reuse*. Cuarta edición. Metcalf & Eddy, Inc. McGraw-Hill: Singapur.

Téllez, G. 2015. Planta Los Tajos prende máquinas a partir de junio. *La Nación*, 26 de enero del 2015. Disponible en: <https://www.nacion.com/el-pais/servicios/planta-los-tajos-prende-maquinas-a-partir-de-junio/QLWTD6V6NRCR3PBN5EEWE7AU4I/story/> (accesado el 30 de setiembre del 2015).

The MBR Site. 2016. *Evoqua Water Technologies: 16B40N + MemPulse™*. Disponible en: <http://www.thembrsite.com/products/mempulse-siemens-water-technologies/> (accesado el 29 de marzo del 2016).

Tsarakis, K.P.; Mara, D.D.; Angelakis, A.N. 2001. Application of cost criteria for selection of municipal wastewater treatment systems. *Water, Air and Soil Pollution* 142: 187-210, 2003. Kluwet Academic Publishers. Holanda.

Universidad de Costa Rica (UCR). 2017. *Indicadores Internacionales de Desarrollo: Costa Rica según el Índice de Desempeño Ambiental (EPI)*. Observatorio del Desarrollo (OdD). Disponible en: <http://www.odd.ucr.ac.cr/proyectos/indicadores-internacionales-de-desarrollo/indice-del-desempeno-ambiental?language=en> (accesado el 18 de enero del 2017).

Villalobos, A.; Íncer, A. 2011. Sobre el reúso de aguas residuales. *La Nación Digital*, 4 de junio del 2011, http://www.nacion.com/archivo/reuso-aguas-residuales_0_1199480057.html (accesado el 10 de abril del 2017).

Water Environment Federation (WEF), 2011. *Biofilm Reactors*. WEF Manual of Practice No. 35.

Prepared by the Biofilm Reactors Task Force of the Water Environment Federation. Alexandria, EE.UU. ISBN: 978-0-07-173708-1.

Water Environment Federation (WEF), American Society of Civil Engineers (ASCE), Environmental and Water Resources Institute (EWRI). 2010. *Design of Municipal Wastewater Treatment Plans, Volume 2: Liquid Treatment Processes*. WEF Manual of Practice No.8, ASCE Manual and Reports on Engineering Practice No.76. Fifth Edition. McGraw-Hill: Virginia.

Weiss, J.; Alvarez, M.; Tang, Ch.; Horvath, R. y Stahl, J. 2005. *Evaluation of Moving Bed Biofilm Reactor Technology for enhancing nitrogen removal in a stabilization pond treatment plant*. Sanitation Districts of Los Angeles County, California. Water Environment Federation (WEF).

Worldwide Inflation Data. 2017. *Inflación de Brasil 2017*. Disponible en: <http://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/brasil/inflacion-historica/ipc-inflacion-brasil-2017.aspx> (accesado el 29 de agosto del 2017).

Worldwide Inflation Data. 2017. *Inflación de los Estados Unidos 2017*. Disponible en: <http://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/estados-unidos/inflacion-historica/ipc-inflacion-estados-unidos-2017.aspx> (accesado el 29 de agosto del 2017).

Worldwide Inflation Data. 2017. *Inflación de España 2017*. Disponible en: <http://es.inflation.eu/tasas-de-inflacion/espana/inflacion-historica/ipc-inflacion-espana.aspx> (accesado el 29 de agosto del 2017).

Yang, J. 2013. *Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment [EBook]*. Disponible en: <http://bookboon.com/es/membrane-bioreactor-for-wastewater-treatment-ebook> (accesado el 12 de octubre del 2014) ISBN 978-87-403-0441-1.

Yoon, S. 2011. *Principle and Application of Membrane Bioreactor Process [Online]*. EE.UU.: CRC Press. Disponible en: www.onlinembr.info (accesado el 1 de julio del 2015).

Zamarro, A. 2016. *Intermediate investments in the MBR system [correo electrónico]*. (Comunicación por correo electrónico, desde Massachusetts, EE.UU., el 17 de junio del 2016).

ANEXOS

ANEXOS

Anexos A: Cotizaciones de la tecnología Lodos Activados con Biopelícula Fija Integrada (IFAS)

Anexo A-1: Cotización del paquete de la tecnología IFAS

Fuente: Headworks Bio Inc., 2016.



Railly Solano <railly@gmail.com>

IFAS Costa Rica - Changes in the proposal

Siva Angappan <sAngappan@headworksintl.com>

29 de enero de 2016, 18:11

Para: Railly <railly@gmail.com>

Cc: Andrés Lazo Paez <alazo@aya.go.cr>, Alvaro Araya Garcia <alvaraya@aya.go.cr>

Hi Railly,

We have revised the design and the budgetary pricing for the Los Tajos project. The following is the summary of the design and pricing for one train **(30,000 m3/day)**.

Flow is 30,000 m3/day per train.

Parameter	Influent	After IFAS	After CAS	Effluent Limit
BOD ₅ (mg/l)	270	< 65*	< 15*	< 30
COD (mg/l)	675	< 175*	< 125*	< 150
TSS (mg/l)	290	290	330	< 30
FOG (mg/l)	20	< 20	< 20	< 30
TKN (mg/l)	46			
NH ₃ -N (mg/l)	23			
TN (mg/l)				
TP (mg/l)	4			
Turbidity				
TDS (mg/l)				
Alkalinity (mg/l)				

pH	6.8 - 7.6	6 - 9	6 - 9	5 - 9
Design Temperature (°C)	21 - 24	21 - 30	21 - 30	15 - 40

* BOD and COD values listed for After IFAS and After CAS are based on soluble BOD and soluble COD.

IFAS Design Summary - EACH TRAIN of 30,000 m3/day			
Parameter	Quantity		Comment
Design:	30,000	m3/day	
Flow Peak hourly:	60,000	m3/day	
Peak daily:	30,000	m3/day	
IFAS Bioreactor - Volume	1,120	m3	By Others
IFAS Bioreactor - Dimensions	8 m W x 20 m L x 7 m SWD		
IFAS Bioreactor - Media	560	m3	ActiveCell 920
IFAS Bioreactor - Air Requirement	9,080	Sm3/hr	at 20 C & at 0.77 bar (11.2 PSIG)
Biofilm carrier fill fraction	50	%	
CAS Bioreactor - Volume	672	m3	By Others
CAS Bioreactor - Dimensions	8 m W x 12 m L x 7 m SWD		
CAS Bioreactor - Media	NA	m3	
CAS Bioreactor - Air Requirement	2,190	Sm3/hr	at 20 C & at 0.77 bar (11.2 PSIG)
Biofilm carrier fill fraction	NA	%	
MLSS	2,000	mg/L	

Internal Nitrates Recycle Ratio (Design)	NA		
Carbon Dose Requirement	NA	mg/L BOD	
RAS	50%	% of Q	RAS at 0.67% d.s.

Other Equipment	Quantity	Comment
Equalization	N/A	As Necessary
Primary Screen	By Others	Removes solids > 6 mm
Primary DAF/Clarifier	N/A	TSS Removal
Mechanical Mixers	N/A	
Blowers	By Others	
Secondary Clarifier	By Others	TSS Removal
Polishing Filter	N/A	
Disinfection	By Others	As Necessary
Pumps, Etc.	By Others	As Necessary
Instrumentation, Dosing, and Control Systems	By Others	As Necessary

* The above design is for a single IFAS train treating 30,000 m³/day.

As you see above, I had to extend the IFAS tank length by 4 m to handle the higher loads, keeping the same fill fraction of 50%.

The price of the equipment went up by about 20% due to the increase in load to **US\$ 839,000 per train**.

Please review and let me know if you need additional information.

Have a great weekend!

Best Regards,

Siva Angappan

Headworks Bio Inc.

From: Raily [mailto:raily@gmail.com]

Sent: Friday, January 22, 2016 1:49 PM

To: Siva Angappan <sAngappan@headworksintl.com>

Cc: Andrés Lazo Paez <alazo@aya.go.cr>; Alvaro Araya Garcia <alvaraya@aya.go.cr>

Subject: Re: IFAS Costa Rica - Changes in the proposal

[El texto citado está oculto]

Anexo A-2: Cotizaciones de los sopladores

Fuente: Gardner Denver., 2016a y 2016b.



Centrifugal Products

Date: março 3, 2016

Proposal Num.: GD16-SF-1003251 rev0

To: Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

Attention: Ing. Raily Solano Ramírez

Reference: Sopladores PTAR Los Tajos)

Scope of Equipment Supply:

We are pleased to offer **three (3)** Gardner Denver Multi-Stage Centrifugal Series Blower, Model 2405. The Blower will be our standard heavy-duty construction complete with:

Blower Model 2405-ADOI, each blower is complete with:

- Cast iron (ASTM A-48) inlet and outlet heads
- Cast iron (ASTM A-48) intermediate sections
- Cast aluminum (ASTM 356-T6) impellers
- Heavy duty alloy steel shaft
- Plated steel Baffle rings
- Labyrinth shaft seals
- Anti-friction bearings with RTD's & Vibration Probes
- Oil lubricated
- Long Term Storage for Export Shipment
- Baseplate for both blowers and driver
- Drive couplings, Thomas series 71 or equal
- Coupling guards
- Inlet Expansion Joint, 24 Inch
- Discharge Expansion Joint, 20 Inch
- Inlet Air Filter-Silencer, Cartridge; Rated 35000 CFM; 36" Flg
- Check Valve, 20 Inch
- Inlet Butterfly Throttle Valve, Wafer, Metal Seat, 4-20 mA Actuator; 24"
- Blow-off with Silencer and Butterfly Valve, Elect Act, 120 V; 8"
- Motor 1900HP 3600RPM, 2300 V 60HZ TEFC
- All crated for export shipment



Centrifugal Products

- PLC Based Multigard II Control Panel To Include:
 - NEMA 12 - 304SS Enclosure
 - Color Touch Screen HMI 6"
 - AB Micrologix 1200 PLC or equal inputs for:
 - Inlet Valve Control (4-20mA)
 - Blow-off Valve, Discrete Open/Close
 - Blower Surge Protection/Prevention (4-20mA)
 - Motor Overload Protection (4-20mA)
 - Blower Inlet Bearing Vibration (4-20mA)
 - Blower Inlet Bearing Temp (100 Ohm RTD)
 - Blower Outlet Bearing Vibration (4-20mA)
 - Blower Outlet Bearing Temp (100 Ohm RTD)
 - Motor Bearing Temp (100 Ohm RTD)
 - Motor Stator Temp (100 Ohm RTD)
 - 24VDC Power Supply
 - Indicating lights "Power On, Start, Stop, Reset"
 - Ethernet Communications
 - Selector switch for "Local-Off-Remote"
 - Customer to provide 120 VAC power
 - Fully assembled and tested



Centrifugal Products

Blower Performance

PHASE I (2+1 BLOWERS)

Gas:	Air	Mole wt	28.55
Cp	0.25	k	1.40
Pbar:	976 m (Altitude)		
Flow:	40.860 M3/H (S)	RH:	80%
Tin:	30 Deg C	Tout:	113 Deg C
Pin:	-0,20 PSIG	Pout:	11.2 PSIG
Speed:	3,570 RPM	Power:	1,187 KW

PHASE II (3+1 BLOWERS)

Gas:	Air	Mole wt	28.55
Cp	0.25	k	1.40
Pbar:	976 m (Altitude)		
Flow:	39.346 M3/H (S)	RH:	80%
Tin:	30 Deg C	Tout:	114 Deg C
Pin:	-0,20 PSIG	Pout:	11.2 PSIG
Speed:	3,570 RPM	Power:	1,157 KW

Factory Testing:

The blower is given a standard factory mechanical test* consisting of operating the unit for a minimum of one hour after stabilization. Speed, vibration, and temperature levels are recorded and verified to be within Gardner Denver engineering and ISO quality PTC9016 standards during this test. The customer as measured by the above mechanical test shall consider successful performance of this equipment as the basis for acceptance unless otherwise noted.

Gardner Denver reserves the right to conduct all tests with its shop test driver in the event that the actual driver's requirements are incompatible with Gardner Denver's test facilities or a bare blower is purchased.



Centrifugal Products

Pricing:

Price: Net Each U.S. Funds; Ex-Works Ex Works Factory - Bentleyville (USA) or Campinas (Brazil)
according to the factory capacity

Price			
Item	Description	Quant.	Total Price
01	Hoffman Blower 2405	03	
		Total	US\$ 1.423.000

Shipment: 23-25 Weeks after Receipt of Order and/or Release to Manufacture

Terms: Irrevocable Letter of Credit Confirmed on an U.S. Bank



Centrifugal Products

Notes & Comments:

1. Gardner Denver's standard warranty and general terms of sale shall apply
2. All orders are subject to acceptance at the factory within 30 days from the date hereon.
3. All pricing is net, US funds.
4. All pricing is ex-works.
5. Shipment is subject to confirmation at time of order / release to manufacture.
6. The complete scope of supply is as noted above. Any item not specifically noted is not included.
7. Motor starters and installation services are not included unless otherwise noted.
8. Paint procedures shall be Gardner Denver's standard specification unless otherwise noted.
9. On-site start up assistance by a Gardner Denver factory technician is available at additional cost.
10. Accessories quoted are shipped loose for mounting by others, unless otherwise noted.
11. Pre-start up assistance will be provided by manufacturer's representative. Blower coupling alignment must be checked and adjusted to limits as noted in O&M manual by others after equipment is installed and prior to start-up at the job site. The representative does not make adjustments to the alignment.
12. Price escalation will apply if order is not shipped within one year of order date

Commercial Terms:

The following Gardner Denver forms are attached and apply:

- Terms and Condition of Sale
- Field Service – Rates

If you have any questions or if we may be of other service, please contact us.

Regards,

Márcio Mendes C Garcia
Sales Manager South America
Tel: +55 19 3765-8014
marcio.garcia@GardnerDenver.com

Date: 2/22/2016

Project:

Ptar Los Tajos

Customer:

Inst Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

Sales Order Number:

Application Engineer:

Comments:

Etapas I



Gas Mix: Air(100%)

Model: 2400, 5 Stage(s) (3 x A3) (2 x A5), 3570 RPM

Corrected Values	Original Unit	English Unit	Metric Unit
Inlet Set # 1			
Barometer	976.00 Altitude (m)	13.05 PSIA	0.90 Bars (A)
Inlet Pres.	-0.20 PSIG	12.85 PSIA	0.89 Bars (A)
Inlet Temp.	30.00 Deg C	86.00 Deg F	30.00 Deg C
Inlet Flow	40,860.00 m ³ /hr (S)	29,322.46 ICFM	49,817.30 m ³ /hr (A)
Dis. Pres.	11.20 PSIG	11.20 PSIG	0.77 Bars (G)
Rel. Humid.	80.00 %	80.00 %	80.00 %

Measured Values	Plot Unit	English Unit	Metric Unit
Inlet Set # 1			
Surge Flow Rate	18,686.99 m ³ /hr (S)	13,410.39 ICFM	22,783.54 m ³ /hr (A)
Surge Pressure	14.82 PSIG	14.82 PSIG	1.02 Bars (G)
Pres. Rise to Surge	3.63 PSIG	3.62 PSIG	0.25 Bars (G)
Max. Vol. Turndown	54.27 %	54.27 %	54.27 %
Pressure @ Design	11.24 PSIG	11.24 PSIG	0.77 Bars (G)
Power @ Design	1,592.49 HP	1,592.49 HP	1,187.54 KW
Effic. @ Design	72.04 %	72.04 %	72.04 %
Temp. @ Design	236.12 Deg F	236.12 F	113.40 C

Gas Parameters	English Unit	Metric Unit
Inlet Set # 1		
Molecular Weight	28.55 lbm/lbmol	28.55 kg/kgmol
R Value	54.13 ft. lbf/lbm.R	0.29 kJ/kg.K
Density	0.06 lbm/ft ³	1.00 kg/m ³
Sp. Heat @ Const. P	0.25 BTU/lbm.R	1.02 kJ/kg.K
Ratio of Sp. Heats	1.40	1.40
Saturated Vapor Pres.	0.61 PSIA	0.04 Bars (A)
Partial Pres. of Gas	12.36 PSIA	0.85 Bars (A)
Partial Pres. of Vapor	0.49 PSIA	0.03 Bars (A)

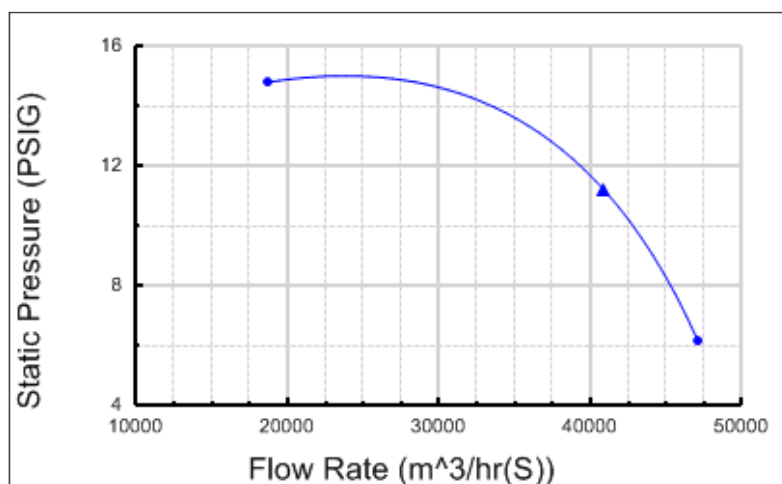
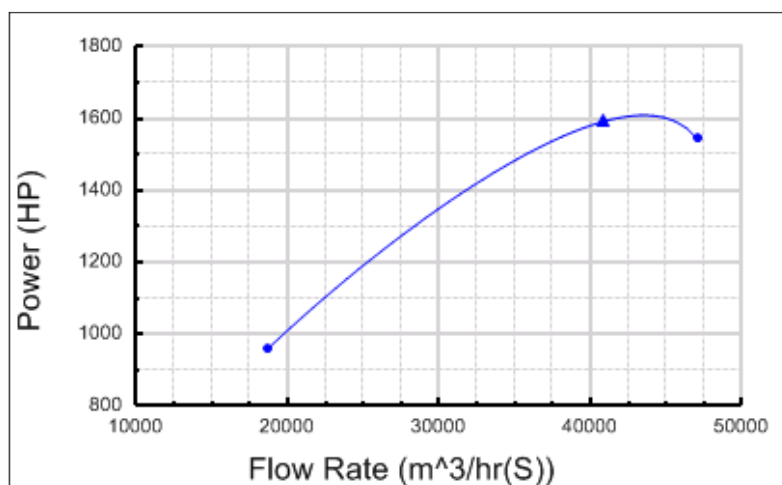
Gas Mix: Air(100%)
Model: 2400, 5 Stage(s) (3 x A3) (2 x A5), 3570 RPM

Date: 2/22/2016



Legend for Inlet Conditions

#1 ▲ #2 ■ #3 ▼ #4 ◆ STD ●



Date: 2/22/2016

Project:

Ptar Los Tajos

Customer:

Inst Costarricense de Acueductos y Alcantarillados

Sales Order Number:

Application Engineer:

Comments:

Etapla II



Gas Mix: Air(100%)

Model: 2400, 5 Stage(s) (3 x A3) (2 x A5), 3570 RPM

Corrected Values	Original Unit	English Unit	Metric Unit
Inlet Set # 1			
Barometer	976.00 Altitude (m)	13.05 PSIA	0.90 Bars (A)
Inlet Pres.	-0.20 PSIG	12.85 PSIA	0.89 Bars (A)
Inlet Temp.	30.00 Deg C	86.00 Deg F	30.00 Deg C
Inlet Flow	39,346.00 m ³ /hr (S)	28,235.97 ICFM	47,971.41 m ³ /hr (A)
Dis. Pres.	11.20 PSIG	11.20 PSIG	0.77 Bars (G)
Rel. Humid.	80.00 %	80.00 %	80.00 %

Measured Values	Plot Unit	English Unit	Metric Unit
Inlet Set # 1			
Surge Flow Rate	18,686.99 m ³ /hr (S)	13,410.39 ICFM	22,783.54 m ³ /hr (A)
Surge Pressure	14.71 PSIG	14.71 PSIG	1.01 Bars (G)
Pres. Rise to Surge	3.52 PSIG	3.51 PSIG	0.24 Bars (G)
Max. Vol. Turndown	52.51 %	52.51 %	52.51 %
Pressure @ Design	11.20 PSIG	11.20 PSIG	0.77 Bars (G)
Power @ Design	1,552.44 HP	1,552.44 HP	1,157.67 KW
Effic. @ Design	73.22 %	73.22 %	73.22 %
Temp. @ Design	237.97 Deg F	237.97 F	114.43 C

Gas Parameters	English Unit	Metric Unit
Inlet Set # 1		
Molecular Weight	28.55 lbm/lbmol	28.55 kg/kgmol
R Value	54.13 ft. lbf/lbm.R	0.29 kJ/kg.K
Density	0.06 lbm/ft ³	1.00 kg/m ³
Sp. Heat @ Const. P	0.25 BTU/lbm.R	1.02 kJ/kg.K
Ratio of Sp. Heats	1.40	1.40
Saturated Vapor Pres.	0.61 PSIA	0.04 Bars (A)
Partial Pres. of Gas	12.36 PSIA	0.85 Bars (A)
Partial Pres. of Vapor	0.49 PSIA	0.03 Bars (A)

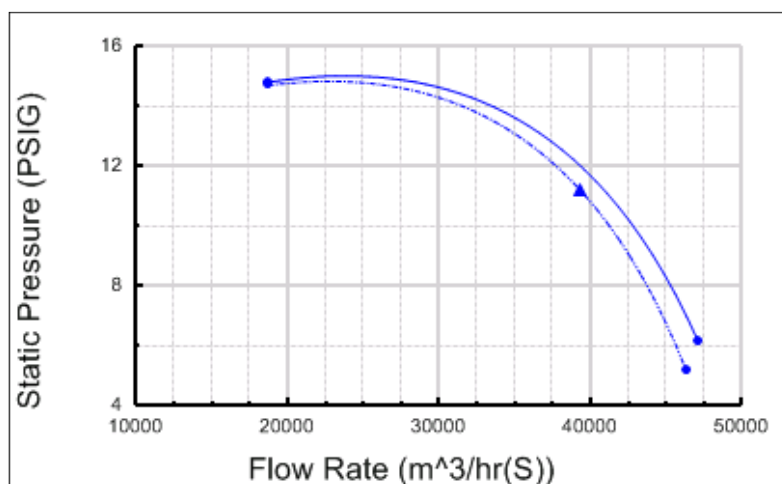
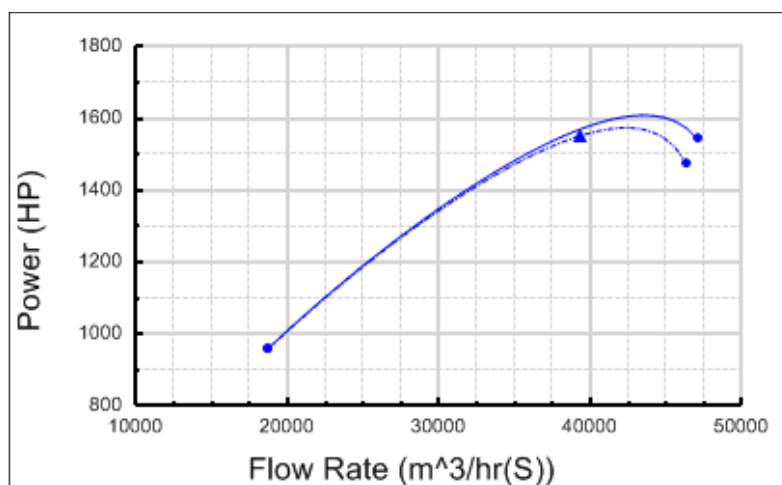
Gas Mix: Air(100%)
Model: 2400, 5 Stage(s) (3 x A3) (2 x A5), 3570 RPM

Date: 2/22/2016



Legend for Inlet Conditions

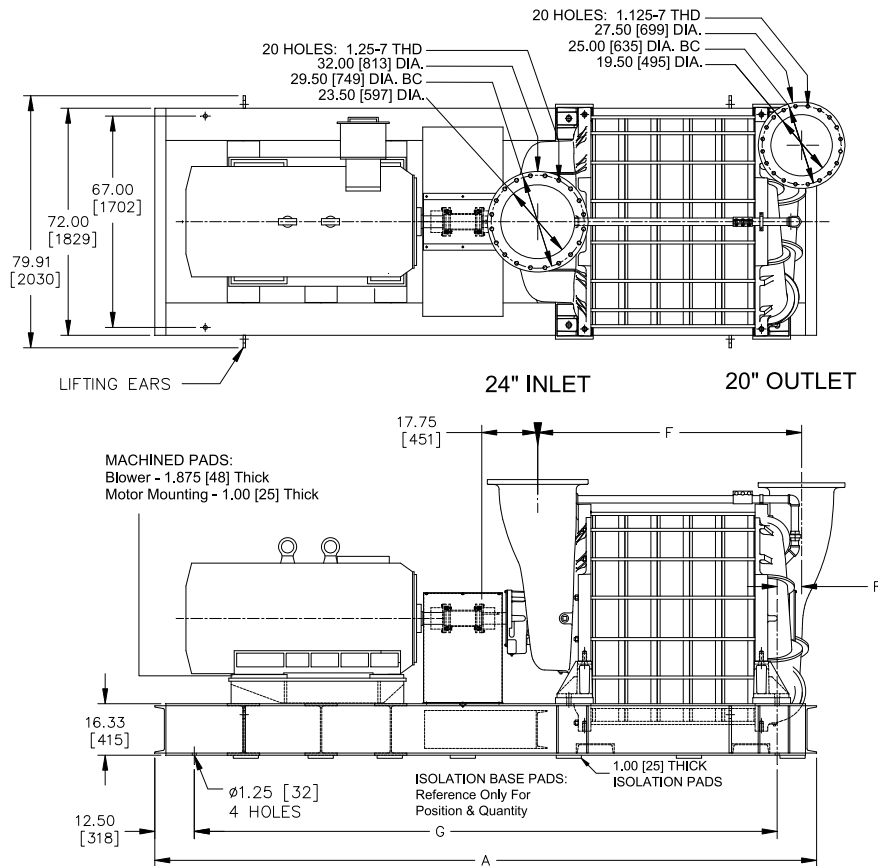
#1 ▲ #2 ■ #3 ▼ #4 ◆ STD ●



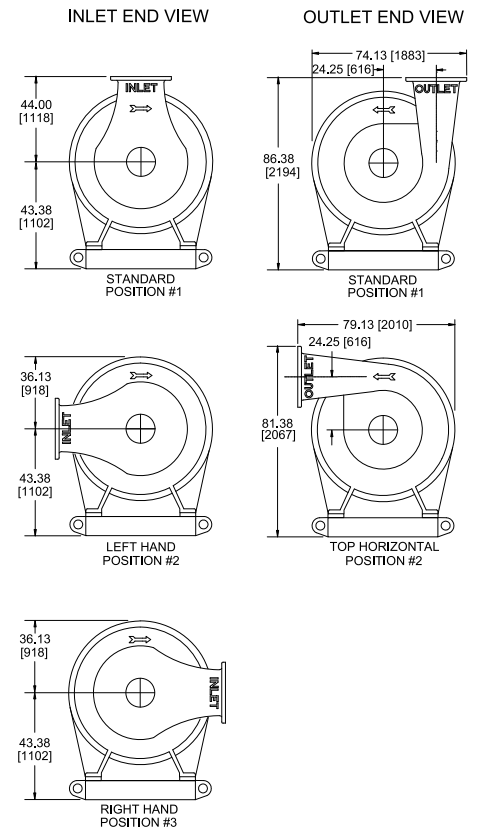


Dimensional Data LAMSON 2400"LowBelly" Centrifugal Products

GENERAL ARRANGEMENT



FLANGE ORIENTATIONS



DIMENSIONAL DATA – inches [millimeters]

FRAME	A	F	G	R
2402	160.00 [4064]	42.75 [1086]	135.00 [3429]	7.75 [197]
2403	170.00 [4318]	53.00 [1346]	145.00 [3683]	7.75 [197]
2404	180.00 [4572]	63.25 [1606]	155.00 [3937]	7.75 [197]
2405	197.00 [5004]	73.50 [1867]	172.00 [4369]	7.75 [197]
2406	237.00 [6020]	83.75 [2127]	212.00 [5385]	7.75 [197]

WEIGHTS – lb (kg) & INERTIA – lb-ft² [kg-m²]

FRAME	PKG. LESS MOTOR	BARE UNIT	WK ²
2402	16,760 [7602]	10,760 [4881]	263 [11.05]
2403	19,380 [8791]	13,380 [6069]	378 [15.87]
2404	22,000 [9979]	16,000 [7257]	492 [20.65]
2405	26,120 [11,848]	18,620 [8446]	614 [25.78]
2406	28,740 [13,036]	21,240 [9634]	722 [30.33]

PRODUCT NOTES

- Information is approximate, subject to change without notice, and not for construction use unless certified
- Position #1 is standard inlet & outlet orientation
- A and G dimensions may vary depending on motor frame size

Gardner Denver, Inc.

100 Gardner Park, Peachtree City, GA 30269
Phone: 800-982-3009 / 770-632-5000
Fax: 770-486-5628
E-mail: cf.blowers@gardnerdenver.com
Web: www.HoffmanandLamson.com

01/2011 Page 1 of 1 CF1496285 Vs 00



"Over 150 Years of Leadership"

© 2011 Gardner Denver, Inc.



Technical & Performance Data

LAMSON 2400 Series

Centrifugal Products

DESIGN STANDARD

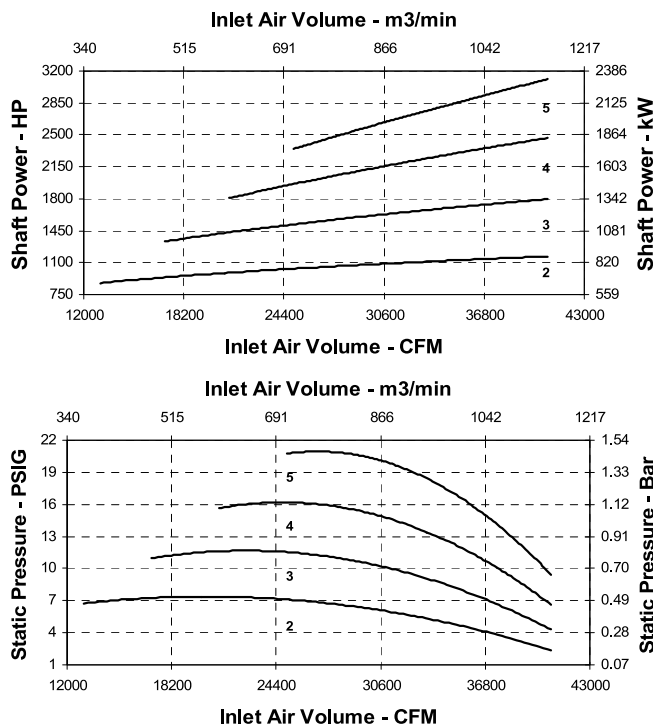
Number of Stages	2-5 (60 Hz) 2-6 (50 Hz)
Inlet Connection	24" Flange, ANSI 125# Drilling
Outlet Connection	20" Flange, ANSI 125# Drilling
Operating Speed	3550 RPM (60 Hz), 2925 RPM (50 Hz)
Casing Pressure	30 PSIG (2.08 bar)
Air Seals	Labyrinth Type - Carbon Ring Optional
Bearings	Anti-friction, designed for extended L ₁₀ life
Lubrication	AEON® CF Oil
Impeller	35.0 inches (889 millimeters) Diameter (statically balanced)
Impeller Tip Speed	545 feet/second (166 meters/second)
Drive Type	Direct Coupled (Inlet drive is standard)
Drive Shaft Diameter	2-3 Stage: 3.3745 inches (85.71 millimeters) 4-6 Stage: 3.6245 inches (92.06 millimeters)
Vibration	.235 in/sec. (5.97 mm/sec.) Peak Velocity
Rotor	Balanced Per ISO 1940, ANSI S2.19

MATERIAL STANDARD

Casing	ASTM A48 Class 30 Cast Iron
Bearing Housings	ASTM A48 Class 30 Cast Iron
Bearing Housing Inserts	ASTM B505 Bearing Grade Bronze
Tie Rods	ASTM A322 C4142 Steel
Labyrinth Seal	ASTM B86 Z35631 Alloy Zinc Aluminum 12
Carbon Ring Seal Optional	ASTM C695 Fine Grain Molded Graphite
Joint Sealing	RTV Silicone Compound
MBR™ Baffle Rings	ASTM A36 Electroless Nickel Plated Steel
Balance Piston	ASTM A36 HR Structural Steel (3-8 Stage)
Shaft	ASTM A322 Grade 4140CT HRS <i>Stainless Steel Optional</i>
Impeller	ASTM B26 A356-T6 Cast Aluminum
Base & Motor Pedestal	ASTM A36 Hot Rolled Structural Steel
Isolation Base Pads	Suitable Resilient Material
Finish	Universal Primer - Acrylic Topcoat

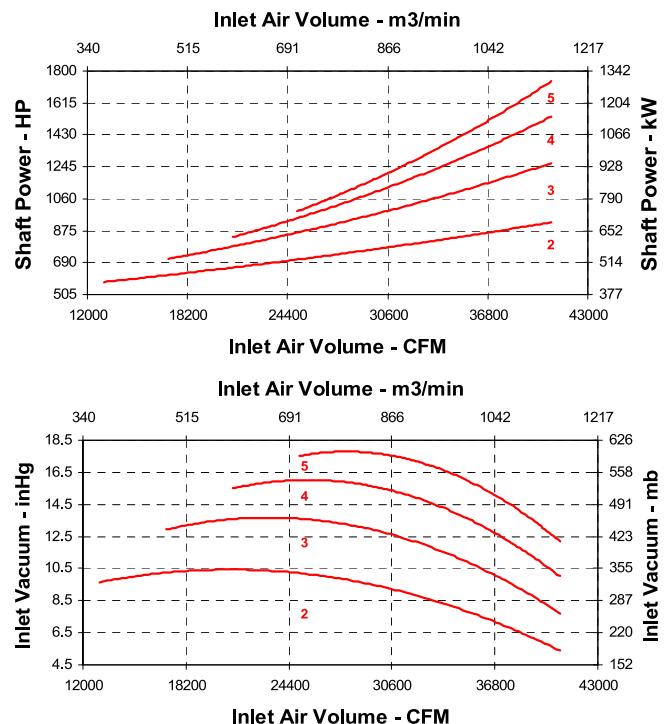
PRESSURE PERFORMANCE

14.7 PSIA [1 Bar], 68°F [20°C],
36% RH, Speed: 3550 RPM



VACUUM PERFORMANCE

29.9 inHg [1 Bar], 68°F [20°C],
36% RH, Speed: 3550 RPM



PRODUCT NOTES

1. Information is approximate and subject to change without notice
2. Performances noted above are typical and not job specific
3. Consult authorized Hoffman/Lamson sales representative for job specific blower or exhauster performance sizing
4. Factory ASME PTC-10 test offered for performance verification

Gardner Denver, Inc.

100 Gardner Park, Peachtree City, GA 30269
 Phone: 800-982-3009 / 770-632-5000
 Fax: 770-486-5628
 E-mail: cf.blowers@gardnerdenver.com
 Web: www.HoffmanandLamson.com



"Over 150 Years of Leadership"

Empresa: Gardner Denver
Contacto: Ing. Martin Fonseca

Confirmando que lo que se recomienda son **4+1 en la primera etapa y 6 + 2 para la segunda etapa.**

- Soplador Cycloblower de desplazamiento positivo tipo tornillo
- Aire libre de aceite
- Con silenciador en la salida
- Filtro silenciador en la entrada
- Cabina acústica para atenuar el ruido a menos de 85 dbA
- Motor de 250HP

Precio unitario con impuestos en Costa Rica, sin impuesto de ventas US\$120,000 c/u

Precio unitario con impuestos en Costa Rica, sin impuesto de ventas US\$20,000 c/u

Precio unitario con impuestos en Costa Rica, sin impuesto de ventas US\$35,000 c/u

1 panel de velocidad variable	US\$35,000	=	US\$35,000
-------------------------------	------------	---	------------

www.gardnerdenverproducts.com

Anexo A-3: Cotizaciones de las bombas

Fuente: Hidrotica., 2016.

02 de Marzo de 2016

Señores:

INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTOS Y ALCANTARILLADOS

PTAR LOS TAJOS

Dirección de Proveeduría

NUMERO PROVEEDOR 1001357

Asunto: BOMBAS PARA LODOS PTAR LOS TAJOS

Estimados señores:

Hidrotica, S.A., cédula jurídica 3-101-192611, apartado postal 3661-1000 San José, teléfono 2224-9778, fax 2224-9883, con domicilio en Guadalupe de Goicoechea, avenida central, de la iglesia Católica 200 metros al este, representada por su Apoderado Generalísimo sin límite de suma, según certificación adjunta, Juan Diego Mora Masís, mayor, de nacionalidad costarricense, vecino de Moravia, cédula 1-0614-0149; presenta la siguiente oferta de bienes y/o servicios para su consideración, de acuerdo a la información suministrada por ustedes:

Teléfonos: 2224-9778 * 2224-9767 Fax: 2224-9883 www.aquacorp.com

COSTO DE LA OFERTA

Item	Cant	Descripción	Precio Unitario	Precio Total
1	5	BOMBA SULZER PARA RECIRCULADO DE LODOS XFP501U SK3.590 PE1250/8, 125 KW, 860 rpm, 3/460/60 Hz motor IE3 Factor Servicio	83.966,00	\$419.830,00
2	5	PEDESTAL PARA BOMBA XFP501U 20"	6.270,73	\$31.353,65
3	5	BOMBA SULZER PARA DESECHO DE LODOS XFP150G CB1.2 PE110/6-G 11 KW, 1190 rpm, 3/460/60 Hz motor IE3 Factor Servicio 1.3	10.181,38	\$50.906,90
4	5	PEDESTAL PARA BOMBA XFP150G	1.782,89	\$8.914,45
		SUBTOTAL1		\$511.005,00
		SUBTOTAL 2		\$511.005,00
		IMPUESTO DE VENTAS 13%		\$66.430,65
		TOTAL		\$577.435,65

HIDROTICA S.A cuenta con taller de servicio propio con personal especializado y capacitado para realizar reparaciones en nuestros equipos certificando la obtención de repuestos y mano de obra para los equipos ofrecidos por más de 5 años.

Alcance de la oferta

BOMBA XFP 501UPE6

- Flujo 2,520 m³/h
- Eficiencia 80.5%
- NPSH 5,92 m
- Temperatura 20° C
- Carga 11,9 m
- 101 kw
- Descarga 20"
- Recirculación de lodos
- Impulsor con tres canales de entrada
- Diámetro impulsor 590mm
- Puerto succion DN500
- Voltaje 460v
- 125 kw
- Numero de polos 8
- Factor de potencia 0,779
- Torque de arranque 2550 Nm
- Insulation class F
- Frecuencia 60 hz
- Velocidad nominal 890 rpm
- Corriente 214 A
- Protección ip68
- Arranque permitidos por hora: 10
- Densidad 998,3 Kg/m³
- Viscosidad 1,005mm²/s
- Solidos de 130 mm

BOMBA XFP 150G GB1

- Flujo 154 m³/h
- Eficiencia 69.3%
- NPSH 0.977 m
- Temperatura 20° C
- Carga 12,5 m
- Descarga 6"
- 7.78 kw
- Desecho de lodos
- Impulsor contrablock
- Diámetro impulsor 285mm
- Puerto succion DN150
- Voltaje 460v
- 11 kw

Teléfonos: 2224-9778 * 2224-9767 Fax: 2224-9883 www.aquacorp.com

- Numero de polos 6
- Factor de potencia 0,714
- Torque de arranque 307 Nm
- Insulation class H
- Frecuencia 60 hz
- Velocidad nominal 1180 rpm
- Corriente 21.1 A
- Protección ip68
- Arranque permitidos por hora: 15
- Densidad 998,3 Kg/m³
- Viscosidad 1,005mm²/s
- Solidos de 100 mm

Lugar de entrega PTAR LOS TAJOS

ASPECTOS GENERALES

Tiempo de entrega: 16 a 18 semanas después de recibida la orden compra

Garantía: Un año contra defectos de Fabrica (no por mala manipulación)

Vigencia de la oferta: 30 días hábiles

Para notificaciones favor informar al teléfono – 2224-9778 fax- 2224-9883
Dirección: 200 mts este de la iglesia católica de Guadalupe
Correo electrónico: ventas@hidrotica.com

Atentamente,



Hugo Jara Tenorio
Asesoría Técnica
Cédula 1-0614-0149
Representante Legal
200 Este de la Iglesia Católica
Guadalupe, San José, Costa Rica
TEL (506) 2224 9778 FAX (506) 2224 9883 7070-0308

Anexo A-4: Cotización e información técnica de los difusores burbuja fina

Fuente: SOLAMSA, 2015c.



Railly Solano <railly@gmail.com>

Consulta

Rodolfo González (SOLAMSA) <gerencia@solamsa.com>
Para: Railly <railly@gmail.com>

3 de diciembre de 2015, 11:56

¡Hola Railly!

Me alegro mucho que la reunión con el Ing. Martín Fonseca haya resultado provechosa.

Con respecto a los difusores, aunque me sigue pareciendo demasiado aire, sí es viable colocarlos de la siguiente manera:

- 1) La capacidad de cada disco difusor de 50 cm es de 300 lpm
- 2) Asumamos una tasa de operación de 280 lpm para dejar un factor de seguridad
- 3) La cantidad de aire requerida, por minuto, sería de $1.990 / 60 = 33.167$ lpm
- 4) La cantidad de discos difusores requeridos serían: $33.167 / 280 = 118,45$; digamos 120 discos
- 5) 120 discos es perfectamente posible acomodarlos en un tanque de 12 x 8 mts, simplemente reduciendo la distancia tradicional entre discos. Una posible configuración es el de colocar 12 ramales (sobre el lado largo de los tanques), espaciados a 1,00 metro entre ellos (a 50 cm de la pared los dos ramales extremos), y, en cada uno de estos doce ramales se colocan 10 discos difusores, lo que nos lleva a colocarlos a una distancia de 80 cm (centro a centro; con una separación de 40 cm con respecto a la pared en los dos discos extremos) para cubrir los 8 metros.
- 6) El precio regular de cada disco difusor de los que nosotros distribuimos es de \$130 + 13% IV. Lógicamente se hace descuento por cantidad. Sin embargo, dado que es un rubro insignificante, de momento puede presupuestarse con el "precio de lista". Hay discos de estas mismas medidas, de otra marca, que son mucho más caros. Igualmente existen difusores de otros diámetros y precios. La que te brindo sería una posibilidad.

Puedo reunirme hacia finales de la tarde. ¿Le queda bien un tipo 4:30 am acá en nuestra oficina?

Cordial saludo,



**DIFUSOR DE AIRE
HOJA DE INFORMACIÓN
(Ficha Técnica)**

*(Traducción al español de la información
contenida en la literatura del fabricante)*

Traducción de la página No. 1:

DIFUSOR DE DISCO DE MEMBRANA FLEXIBLE MODELO SH500

ESPECIFICACIÓN

Descripción:	Difusor de aire, de membrana flexible, de burbuja fina
Modelo:	SH500 MDD
Tamaño:	520 mm de diámetro x 61 mm de altura
Rango de operación:	• Rango de flujo estándar: de 200 a 300 litros de aire /minuto • Flujo máximo: 350 litros de aire/minuto
Tamaño de las burbujas:	De 1 a 3mm.
Eficiencia mínima "Estándar" de transferencia de oxígeno (ver curva):	28%
Pérdida de presión: (ver curva)	300mm. columna de agua
Peso:	2 Kg.
Profundidad de agua recomendada	5 m
Área superficial del difusor:	0.212 m ²

SOLUCIONES TECNICAS AMBIENTALES S.A.

Tel: (506) 288 0025 Fax: (506) 288 0076 E-mail: solamsa@racsa.co.cr
Apartado Postal 1247-1250 San José, Costa Rica

CARACTERÍSTICAS DE LA MEMBRANA DE E.P.D.M.:

Espesor	2mm.
Esfuerzo a la tensión:	19.7 MPa
Dureza (H S) :	50
Elongación (%)	690%
Prueba de rompimiento al ozono:	Ninguno
Durabilidad:	No se presentaron daños después de 180,000 ciclos de estiramiento y encogimiento

MATERIALES DEL DIFUSOR:

A. Membrana de hule:	Hule de E.P.D.M.
B. Cuerpo principal:	Plástico P.P. (Popelen G153)
C. Hule de la válvula “check”:	Hule E.P.D.M.
D. Banda periférica de sujeción:	Acero Inoxidable STS 304
E. Tornillo y tuerca:	Acero Inoxidable STS 304
Conexión:	Adaptador hembra de 50 mm de diámetro nominal (el difusor debe enroscar en un adaptador macho De 50 mm de diámetro nominal)

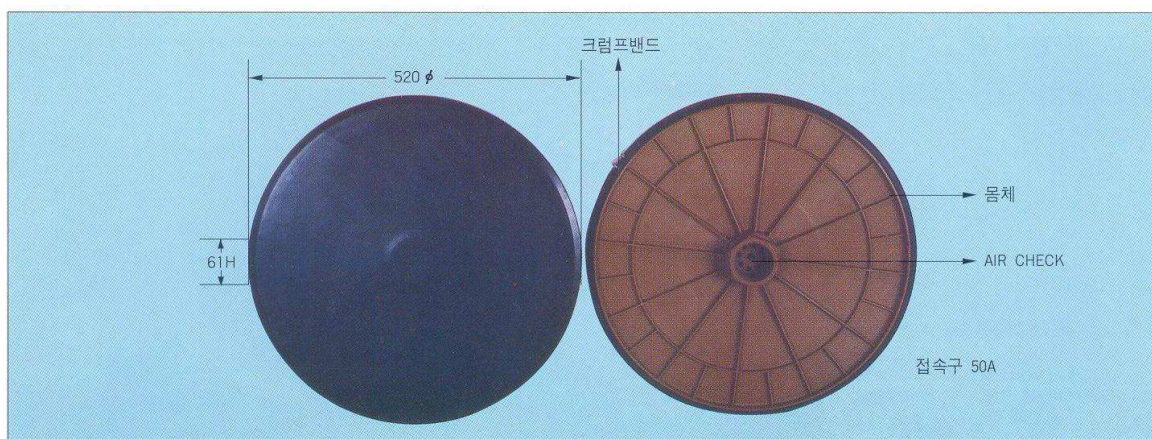
ASPECTOS RELEVANTES DEL DIFUSOR DE MEMBRANA:

1. ALTA EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO; la expulsión uniforme de burbujas finas permite alcanzar una muy alta eficiencia de transferencia de oxígeno.
2. PREVIENE EL CONTRAFUJO; la elasticidad de la membrana y el mecanismo de “check” incorporado previene el contraflujo en caso de que el suministro de aire se detenga.

3. LIBRE DE MANTENIMIENTO; no tiene problemas por obstrucción; no se requiere mantenimiento.
4. DURABILIDAD; no hay penetración del lodo dentro del difusor, lo cual permite obtener un alto desempeño continuo.

CONFIGURACIÓN:

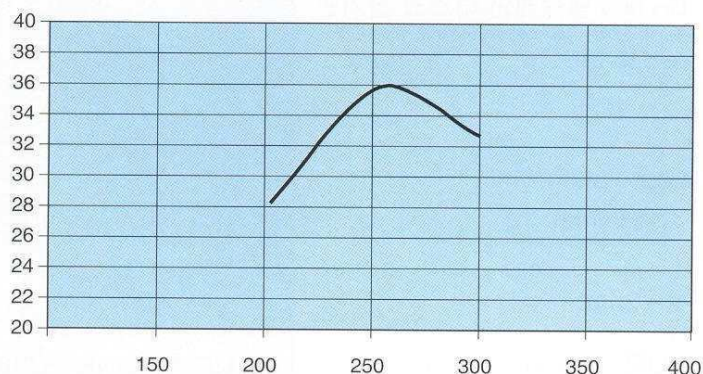
- Banda periférica de sujeción
- Cuerpo
- Conexión



Traducción de la página No. 2:

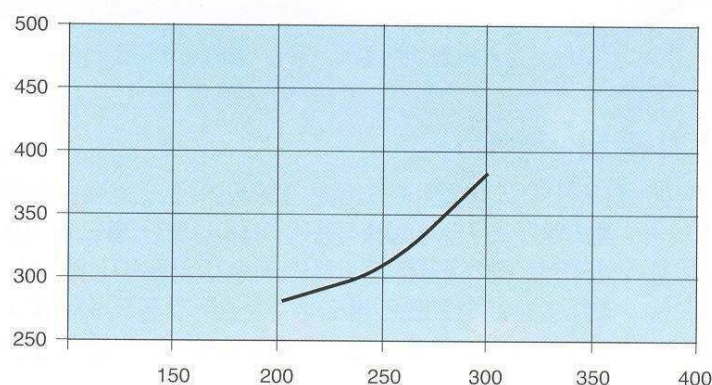
CURVA DE EFICIENCIA DE TRANSFERENCIA DE OXÍGENO EN FUNCIÓN DEL SUMINISTRO DE AIRE

- Eficiencia de Transferencia de Oxígeno expresada en porcentaje (%)
- Suministro de aire expresado en litros de aire por minuto



CURVA DE PÉRDIDAS DE PRESIÓN EN FUNCIÓN DEL SUMINISTRO DE AIRE

- Pérdidas de presión expresadas en mm de columna de agua
- Suministro de aire expresado en litros de aire por minuto



INSTALACIÓN Y MANTENIMIENTO

1. Una vez concluida la instalación de los difusores, por favor llene el tanque parcialmente, hasta la altura de la parte superior de los difusores, abra la válvula de aire ligeramente para lograr un suministro mínimo de aire, a fin de verificar el burbujeo normal de todos los discos difusores.
2. En caso de que el tanque de aireación no vaya a operar de inmediato con agua residual una vez realizada la prueba anterior, por favor drene el tanque y cubra los discos difusores con algún vinil o película de polietileno.

(Fin de la traducción al español de la ficha técnica de los sopladores)

Anexo A-5: Cotización de las rasquetas barrelados de los sedimentadores secundarios

Fuente: PAM, 2015.

Presupuesto N° CI150715R

Empresa:	INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	Att:	ING. RAILLY SOLANO RAMÍREZ
Fecha:	02/12/2015	Revisión:	1
Obra:	PROYECTO TRATAMIENTO SECUNDARIO- 2 ETAPAS	Paginas:	4

Condiciones de la oferta

Validez de la oferta: 30 DIAS

Fecha de entrega: FABRICACIÓN ENTRE 60/80 DÍAS A PARTIR DE LA FECHA PEDIDO Y FIRMA DE PLANOS + TIEMPO DE FLETE.

Portes – Flete: ICOTERM CIF - INCLUIDO A PUERTO LIMÓN – COSTA RICA.

Forma de pago: 50% AL PEDIDO + 50% A LA FINALIZACION DEL EQUIPO.

No incluye:

Condiciones generales

El importe es unitario y neto, sin incluir impuestos.

Pasados el periodo de validez de la oferta, Procesos Auto-mecanizados se reserva el derecho de actualizar el importe.

Los portes correrán a cargo del cliente, excepto cuando se indique y se oferte.

La fecha de entrega se tendrá en cuenta a partir de la recepción de este documento y del croquis del equipo realizado por nuestra parte, aprobado y firmado por el cliente.

Procesos Auto-mecanizados no garantiza el cumplimiento de las fechas de entrega si existen modificaciones de las características del equipo.

El equipo siempre se facturará el día indicado en la fecha de entrega, aún retrasándose la recogida por parte del cliente.

Cuando la forma de pago es mediante pagaré, este debe ser recibido por nuestra parte a la salida del equipo de nuestros talleres, en caso contrario el equipo no se entregará hasta la recepción del mismo.

Todos los equipos disponen de una garantía de un año excepto manipulación, todo ello salvo condiciones particulares pactadas.

D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

- 1 -

D/Doña.....
Firma aceptación

REF-CI3581 DECANTADOR CIRCULAR

- MODELO: PAM DC.
- TIPO: Circular por gravedad.
- TIPO DE MECANISMO: Radial de tracción periférica.
- DIÁMETRO DEL TANQUE: 46000 mm.
- PROFUNDIDAD LATERAL: 4500 mm.
- PEDIENTE FONDO: 8º
- TIPO PASARELA: Radial con apoyo giratorio central y traccionada en el extremo, diseñada para soportar 150 kg/m.
- LONGITUD PASARELA: 24500 mm.
- ANCHO PASARELA: 1000 mm.
- ESTRUCTURA PASARELA: Perfiles estructurales laminados en caliente con soportes para los diferentes mecanismos, refuerzos, soportes para tramex, fabricada en acero al carbono A42b.
- BARANDILLA: Compuesta por pasamanos, quitamiedos y rodapié. Con altura de 1000 mm y realizada en perfiles tubulares y rodapié en chapa de 100 mm, fabricada en acero al carbono.
- PISO PASARELA: Tipo tramex de 30x30 mm en acero galvanizado.
- CAMPANA TRANQUILIZADORA: Cilíndrica realizada en chapa laminada con refuerzos según dimensión, con soportes para anclajes atornillados a la pasarela. Diámetro de campana 2800 mm y altura de 1500 mm realizada en acero al carbono.
- SOPORTE CENTRAL: Para montar sobre columna central de hormigón en el centro de la cuba, compuesto placa de anclaje con orificios para anclaje mediante Split para hormigón, soporte para rodamiento axial, rodamiento y accionamientos oscilantes.
- GIRO CENTRAL: Rodamiento axial.
- CARRO DE TRANSLACIÓN: Compuesto por 2 ud. Rueda en acero y caucho. Accionadas por reductor directo, compuesto por ejes y soportes rodamientos y chasis en acero al carbono.
- VERTEDERO: Tipo Thomson, en tramos de 2000 mm con altura de 200 mm, con 5 entalladuras por metro y un ángulo de entalladura de 90º en acero inox aisi-304.
- DEFLECTOR: Tipo recto en tramos de 2000 mm y una altura de 300 mm inox aisi-304.
- SUJECCION VERTEDERO Y DEFLECTOR: Mediante Split para hormigón de M10 con sujeción mediante varilla roscada, pinzas y tuercas en acero inox aisi-304.

D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

- 2 -

D/Doña.....
Firma aceptación

- TOLVA DE FLOTANTES: Long. trabajo 1000 mm, forma tronco conica, con doble rampa y salida de flotantes de DN-150 en acero inox aisi-304.
- BRAZOS DE BARRIDO: Entramado de tubos unidos entre ellos con soportes superiores para anclar a pasarela y soportes inferiores para sujeción a rasquetas de barrido en acero inox aisi-304.
- RASQUETA DE SOBRENADANTES FIJA: Tipo radial que es la encargada de direccionar los flotados hacia la periferia para ser recogida por la tolva de sobrenadantes acero inox aisi-304.
- RAQUETA DE SOBRENADANTE BASCULANTE: Compuesta por brazo basculante anclado a pasarela y soporte de rasqueta con banda de neopreno para recogida de flotantes, fabricada en acero inox aisi-304.
- RASQUETAS DE BARRIDO FANGOS: Compuestas por chapas laminadas con soportes para los brazos de soporte y contrapletina atornillada para sujeción de bandas de neopreno fabricadas en acero inox aisi-304.
- RASQUETA DE POCETA: Compuesta por soporte tubular y forma triangular para remoción de fangos en poceta de recogida fabricada en acero inox aisi-304.
- TOMA DE CORRIENTE: Mediante colector rotativo de anillos rozantes trifásico de 6+T.
- ACCIONAMIENTO: Motor-reductor eléctrico.
- REGIMEN DE GIRO: 1500 r.p.m.
- POTENCIA: 0.55 Kw.
- PROTECCION MOTOR: IP 55.
- AISLAMIENTO: Clase F.
- TENSION DE ALIMENTACION: 220/380V.
- FRECUENCIA: 50/60 Hz.
- TIPO REDUCTOR: Sinfin-corona.
- VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO: 1.4 m/min.
- TORNILLERÍA: Acero inoxidable calidad A4.
- BANDAS DE RASCADO: EPDM.
- ACABADO ACERO AL CARBONO: Mediante pintura epoxy anticorrosión.
- ACABADO ACERO INOX: Satinado mecánico, decapado y pasivado de las soldaduras.

IMPORTE UNITARIO.....49.680 €.

D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

- 3 -

D/Doña.....
Firma aceptación

FLETE MARÍTIMO

PRECIO CIF PUERTO LIMON, COSTA RICA

1x40' open top (sin extra altura) Ex Aspe – Puerto Limón:4.753 €.

Servicio puerto-puerto, tiempo de tránsito 19 días aprox.
T3, Courier a destino, eur 1 - incluido



D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

- 4 -

D/Doña.....
Firma aceptación

Anexos B: Cotizaciones de la tecnología Biorreactores de Membrana (MBR)

Anexo B-1: Cotización de la tecnología MBR (Etapa intermedia)

Fuente: Evoqua, 2016a.

MemPulse™ Membrane Bioreactor System

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)
LOS TAJOS
FEBRUARY 17, 2016

BUDGETARY PROPOSAL NO. 16P1667MBR

Submitted to

Ing. Raily Solano Ramírez, AyA- Costa Rica



MEMCOR®
an eVOQUA brand

EXECUTIVE SUMMARY

Thank you for your interest in Evoqua Water Technologies' new MEMCOR® MemPulse MBR system. Our MBR technology uses the latest advances in filtration and biological treatment in a combination specifically designed to create highly efficient aeration in conjunction with effective nutrient control with the absolute barrier of membrane filtration. The MEMCOR MBR has several key advantages over both conventional treatment processes and other MBR membrane systems.

MemPulse™ Air Scour System

- The MemPulse air scour device reduces the amount of air required to scour the membranes significantly.
- With a simple device with no moving parts used to irregularly release pulses of air, operation and maintenance costs for the MemPulse system are significantly lower than other systems.

Small Footprint

- Evoqua unique rack arrangement and the elevated operating mixed liquor suspended solids concentrations, of MBR systems, allow for greatly reduce overall space requirement.
- The modular nature of the membrane modules enables the tanks to be configured in the space available.
- Due to the elevated mixed liquor suspended solids up to 10,000mg/L, the biological volume required is greater decreases, up to 70%, compared to secondary clarification.

Independent isolatable membrane tanks

Advanced Process

- The Title 22 approved membranes enable effluent from the Memcor membranes to meet the most demanding effluent requirements and can be designed to meet stringent permit requirements or beneficial reuse such as urban irrigation, cooling tower make water or indirect reuse.
- Evoqua can provide a process warranty for the entire treatment process, ensuring compatibility between the biological process and membrane filtration system, and providing a single source of responsibility for any issues with the system.

Minimizing Maintenance Requirements

- MemPulse™ provides uniform distribution of mixed liquor and air across the entire membrane tank ensuring a consistent mixed liquor environment for each sub-module preventing preferential fouling of membranes.



-
- Separate membrane tanks adjacent to the biological tanks provides the ability to independently control the membrane environment and biological process operations, allowing flexibility in operation.

Remote Monitoring

- Remote monitoring capability allows for real time analysis of critical system parameters to help troubleshoot and support local service people.
- Remote monitoring data logging system allows Evoqua process engineers to analyze system performance and optimize the system configuration for your specific application.

Service Capabilities

Evoqua combines our in-depth system knowledge with our extensive company owned service organization to provide you with qualified local personnel that can manage the preventive and on-going service needs of the proposed MBR system. Our service programs are individually designed to meet the needs of each customer situation. Our service programs can be designed to provide any of the following services:

- Remote data analysis with actionable summary reports
- Completion of on-site membrane clean-in-place procedures
- Treatment system audits and membrane fiber analysis
- Completion of preventive maintenance and parts replacement

We would like to thank you again for your interest in Evoqua's line of MEMCOR Products. We believe that every MEMCOR product comes with more than just equipment – it includes the expansive knowledge of MEMCOR's dedicated team of membrane scientists, engineers, and technicians who stand behind every installation. We are eager to share this expertise with those responsible for providing the world with clean, consistent, and high-quality water.

Should you have any questions regarding this quotation, or would like to request any additional information please contact the Technical Sales Manager listed below.

Evoqua Water Technologies LLC:

Orest Zacerkowny
Director of Sales, MEMCOR Products
Technical Sales Manager
Telephone: 724-612-8804
Facsimile: 978-323-0854
Orest.Zacerkowny@evoqua.com

TABLE OF CONTENTS

EXECUTIVE SUMMARY	2
1 Project Overview.....	5
2 Design Information.....	6
2.1 Influent flows	6
2.2 Influent Water Quality	6
2.3 Effluent Water Quality.....	6
3 Design Basis.....	7
3.1 System Design Basis	7
3.2 BioNutre™ Biological Design Information	8
3.2.1 Configuration Information.....	8
3.2.2 Biological Design Parameters	8
3.2.3 Biological System Information.....	9
3.2.4 Hydraulic Design Basis	9
3.3 Membrane Operating System Design	10
3.3.1 Membrane System Operation	10
3.3.2 Filtered Water Specification	11
4 MBR SCOPE OF SUPPLY.....	12
5 Evoqua Water Technologies LLC – Standard Terms of Sale	16
6 Extended Low Pressure Membrane Module Warranty	19

1 PROJECT OVERVIEW

The following table summarizes the contents of this quotation:

MEMCOR® Model:	12 x 992B40N
BioNutre Biological System	Biological Blowers
12 x 992 B40N Modules	Filtrate and Air Headers
Filtrate Pumping System	RAS Pumping System
Clean-in-Place (CIP) System	Membrane System Blowers
Chemical Transfer System	Custom Tool Package
Compressed Air System	Manufacturing Services (Commissioning and Training)
Warranties	O&M Manuals
Budgetary Proposal Price (Phase 1):	USD \$29,500,000

Please note that the pricing above does not include insurance, bonds, or any applicable taxes.

The scope of supply and pricing are based on Evoqua's standard equipment selection, standard terms of sale and warranty terms as described herein. Any variations from these standards may affect this budgetary quotation. Additionally, please note that this budgetary quotation is for review and informational purposes only and does not constitute an offer for acceptance.

Payment Terms:

10% on Order, net 30

15% on Engineering Submittals, staged submittals allowed, net 30

25% on Order of major rotating equipment, net 30

45% on Delivery, partial deliveries accepted, net 30

5% on Start-up, net 30

Full payment not to exceed 120 days after shipment

Equipment Delivery:

Estimated 26 weeks after receipt of full information and approved drawings when required.

Shipments:

Three (3) sets of submittal drawings, if required, will be issued approximately 12 weeks after receipt and approval of purchase order.

Submittals:

Three (3) sets of submittal drawings, if required, will be issued approximately 12 weeks after receipt and approval of purchase order.

2 DESIGN INFORMATION

The proposed MBR system is sized to provide consistent filtrate quality based upon the hydraulic and feed water characteristics specified below.

2.1 Influent flows

Hydraulic Conditions	Phase 1	Phase 2	Units
Average Daily Flow	10,116	15,336	m ³ /h
Maximum Month Flow	Not Specified	Not Specified	
Peak Week Flow	Not Specified	Not Specified	
Peak Daily Flow	12,420	18,792	m ³ /h
Peak Instantaneous Flow*	17,496	26,460	m ³ /h
Minimum Daily Flow	Not Specified	Not Specified	

2.2 Influent Water Quality

Influent Water Quality	Average	Min	Max	Units
Biochemical Oxygen Demand (BOD ₅)	270	63	420	milligrams/liter (mg/L)
Chemical Oxygen Demand (COD)	675	*	*	mg/L
Total Suspended Solids (TSS)	290	47	712	mg/L
Ammonia Nitrogen (NH ₃ -N)	*	*	*	mg/L
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	46	*	*	mg/L
Total Phosphorus	4	*	*	mg/L
Alkalinity	*	*	*	mg/L as CaCO ₃
Fats, Oils & Grease (FOG), Freon extractable	*	*	*	mg/L
Influent Temperature	22.6	21.6	23.8	degrees Celsius (oC)

Notes:

- (1) * Denotes a value which was not specified in the RFQ. All values must be confirmed for any associated process guarantee and membrane warranty.

2.3 Effluent Water Quality

Effluent Water Quality	Value	Units
BOD ₅	<30	mg/L
COD	None	mg/L
Total Suspended Solids	<30	mg/L
Total Nitrogen	None	mg/L
Total Phosphorus	None	mg/L
Turbidity	None	NTU

3 DESIGN BASIS

The Membrane Operating System (MOS) has been designed around the following parameters.

3.1 System Design Basis

Design Parameter	Value
Membrane Pre-Screening	< 1.5 mm perforated System designed to prevent screen bypass under all conditions
Grit Removal	> 95 % of particles > 150 micron @ SG = 2.0 > 95 % of particles 100 micron, @ SG = 2.6 > 50 % of particles 100-150 micron @ SG = 2.6 Removal efficiency shall meet or exceed these values across a flow range of 25 - 100 % of PHF. System designed to prevent Grit removal bypass under all conditions
Raw Sewage	>90% Municipal
ML Capillary Suction Time (CST)	< 50 seconds
Sludge Retention Time (SRT)	10 days to 22 days
Raw Sewage: Fats, Oils and Greases (FOG) Hydrocarbons	< 80 mg/L < 5 mg/L
MLSS Temperature Range	10 – 25° C
Site Elevation	~1200 meters above MSL
Effluent Soluble BOD ₅	< 5 mg/L
Effluent Ammonia	< 1 mg/L
Coagulant Addition	Aluminum Sulfate ≤ 50 mg/L
Biological Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)	4,000 to 8,500 mg/L
Biological Seed Screening	Through membrane pre-screen or temporary screen of < 1 mm perforated plate or 0.75 mm mesh
Filtrate Pump and Pipework Design	> 65 kPa TMP
Bioreactor Foam / Scum Removal	Required Foam / scum removal to be carried out to control coverage to < 30 % of surface area
Bioreactor Waste Streams	WAS and grit dewatering system/s to achieve 95 % removal of > 50 um particles. Scum / Foam to be discharged to WAS dewatering system. Supernatant returned to the headworks prior to grit removal
CIP Waste Disposal	Return to influent balance tank

Notes

- (1) Any additional requirement for neutralization to be decided during detailed design.
- (2) If the wastewater alkalinity is less than the Table value, supplemental alkalinity may be required to ensure the pH does not inhibit bacterium growth.

- (3) Inhibitory Matter and Heavy Metals must be less than the threshold limits (or within any ranges specified), as defined on page 227 of WPCF Manual of Practice No. 8, 1977 Edition (See Appendix II) The wastewater shall also be free of any substance toxic or inhibitory to the biological treatment process as determined by treatability tests using Method 302B; OECD Guideline for Testing of Chemicals, Adopted 17 July 1992 or International Organization of Standardization, Evaluation of the Ultimate Aerobic Biodegradability of Organic Compounds, ISO/DIS 7827, IOS, Washington, D.C, 1983.

3.2 BioNutre™ Biological Design Information

The following sections outline the design basis for the biological system. The parameters detailed below are based on max month flow conditions and the average wastewater concentrations outlined above in this proposal.

3.2.1 Configuration Information

The proposed biological system is designed with an aerated anoxic zone and two aerobic tanks. EWT has extensive experience with this arrangement, which we feel provides superior performance and flexibility when coupled with EWT's biological treatment expertise and controls architecture.

System Configuration	Trains
Number of Parallel Aeration Trains	4
Number of Tanks per train	4

The adjacent tanks use common intermediate walls with the following tank configuration. The proposed configuration of each train is:

Tank	Quantity /Train	Length (m)	Width (m)	SWD (m)	Volume (meters ³)	% Volume	HRT (hours)
Aerated Anoxic 1 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Aerated Anoxic 2 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Aerobic 2 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Aerobic 2 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Total					24,466	100.00%	9.67

3.2.2 Biological Design Parameters

The following design parameters were used as the basis of design for sizing the proposed biological system.

Design Parameters	Value	Units
Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)	5,500	mg/L
Organic Loading Rate	0.67	kg/m ³ /d
Solids Retention Time (SRT)	9	d
Return Sludge Pumping Rate	250	% of ADF
Sludge Yield	0.92	
Biosolids Produced	60,276	kg/d

3.2.3 Biological System Information

Reactor	Volume Split	AOR Split	DO, mg/L	Diffuser AOR (lb/hr)	FCF Diffusers (AOR/SOR)	Diffuser SOR (lb/hr)
Aerated Anoxic 1 (Fine Bubble)	25.0%	20.2%	0.0	161.22	0.27	599.05
Aerated Anoxic 2 (Fine Bubble)	25.0%	22.9%	0.2	214.12	0.36	599.38
Aerobic 1 (Fine Bubble)	25.0%	27.1%	1.0	253.26	0.42	598.36
Aerobic 2 (Fine Bubble)	25.0%	29.9%	2.0	280.03	0.47	598.56
Total	100.0%	100.0%		908.6		2395.4

Reactor	No. of Diffusers	Design SCFM per Diffuser	Max SCFM per Diffuser
Aerated Anoxic 1 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1
Aerated Anoxic 2 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1
Aerobic 1 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1
Aerobic 2 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1

3.2.4 Hydraulic Design Basis

The hydraulic design capacities for the designs presented in this proposal are listed below:

Design Conditions	Flow	Units	Continuous Duration	Maximum Duration
Average Daily Flow (ADF)	10,116	m ³ /h	365 consecutive days	N/A
Max Month Average Day Flow (MMADF)	12,500	m ³ /h	30 consecutive days	30 consecutive days
Maximum Day Flow (MDF) One Tank Offline	12,500	m ³ /h	48 hours	140 hrs in 30 days

Note

1. Flow Condition for RFI can be sustain continuously at the flux specified in the RFI.
2. Average Day Flow (ADF): this is the average flow for the plant measured on monthly basis. If flow is grater Diurnal Peak Flow for > 3 hrs per day a chlorine MW is required.
3. After all Peak Flow events; Peak Week, Peak Day, Peak Hour the filtrate flow will be returned to Average Day Flow for an equivalent period to that of the peak flow period before entering another peak flow operation.
4. After any Peak Day Flow and Peak Hour Flow Events, a chlorine Maintenance Clean is required.

3.3 Membrane Operating System Design

This section outlines the design basis for the MemPulse™ membrane system.

Design Criteria	Value	Units
Module Type	B40N + MemPulse™	
Modules per Rack	16	
Weight of Wet Rack Assembly ¹	600	Kg
Weight of Fouled Rack Assembly ¹	850	Kg
Total Number of Membrane Tanks	12	
Number of Racks per Tank (installed)	62	
Spare Racks Slots per Tank	18	
No. of modules installed per Tank	992	
Membrane Area per Tank	37,299	m ²
Tank Length	4.1	m
Tank Width	23.5	m
Tank Depth (top of concrete)	3.2	m
Tank Weir Depth	2.5	m

¹ Weight provided includes weight of spreader bar.

3.3.1 Membrane System Operation

Design Fluxes				
	ADF	PDF	PHF	Units
Flow Condition	242.7	207	207	MLD
No. of Membrane Tanks in Operation	12	2	1	—
No. of membrane Tanks in Standby	0	0	1	—
Net Flux	22.6	6.4	12.8	lmh
Net Flux (temperature-corrected)	22.6	8.4	16.7	lmh
Instantaneous Flux	24.7	7.0	13.9	lmh
Instantaneous Flux (temperature-corrected)	24.7	9.1	18.2	lmh

Mixed Liquor Feed Flow Requirements MBR				
	ADF	MMF	N-1	Units
Max MLSS Concentration in the Membrane Tank	7,700	7,700	7,700	mg/L
Total Mixed Liquor Feed Flow Required	35,394	43,473	61,250	m ³ /h

Air Scour Requirements			
Avg. Air Flow per Tank	4036 Nm ³ /h (0°C)	Avg. Discharge Pressure	31.6 kPag

The following table summarizes the maintenance procedures to ensure optimal performance of the MemPulse™ membrane system at average dry weather flow (ADWF).

Parameter	Relaxation	Maintenance Clean	Sodium Hypochlorite CIP	Citric Acid / Sulfuric Acid CIP
Interval Between Cycle	12 min	7 days	90 days	180 days
Cleaning Cycle Duration	60 sec	50 min	480 min	480 min

3.3.2 Filtered Water Specification

The equipment offered will provide the following “Filtered Water” quality:

Parameter	Units	Quality (90 % ile) ¹	Quality (Maximum) ¹
Suspended Solids	mg/L	≤ 5	N/S
Turbidity	NTU	≤ 0.2	0.5
Bacteria ²	Log Removal	≥ 4	N/A
Virus ²	Log Removal	≥ 2.0	N/A

Note

1. Sufficient samples to be taken such that two or more non-conforming results are required to demonstrate non-conformance.
2. As measured by filtrate turbidity.

Please find the *MemPulse™ Membrane Bioreactor (MBR) System* brochure and *MEMCOR® B40N Membrane Filtration Module Specification* sheet attached with this proposal.

4 MBR SCOPE OF SUPPLY

The following equipment is proposed for the Phase 1 design:

Biological Process Equipment

Qty.	Description
34,560	Fine bubble diffusers.
8	ORP Probe.
8	DO Probe.
16	Mounting Kits for Probes.
8	Controller for Probes.
32	Butterfly valves.
12	Blower discharge valves.
12	Blower discharge pressure transmitter.
12	Blowers.

Membrane Operating System Equipment

Qty.	Description
11904	B40N membrane submodules fabricated of oxidant-resistant polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane material.
11904	MemPulse™ devices.
744	Rack assembly (16 module capacity) consisting of header assemblies, guide racks, mixing skirt, and air dropper tube.
12 Lot	Stainless Steel Cell kit for mounting racks.
12	Centrifugal filtrate suction pump controlled by Variable Frequency Drive. One (1) per tank.
12	Centrifugal mixed liquor RAS pump designed to return the mixed liquor from the membrane tanks. One (1) per tank.
12	Positive displacement membrane air scour blower designed to meet average and peak air flow requirements. One (1) per tank.
1 lot	Instrumentation integral to monitor and control the membrane system including level transmitters, level switches, flow meters, pressure transmitters, and pressure gauges.
12	Turbidimeter to measure the turbidity of the filtrate from each membrane tank.
12 lot	Valves required for equipment isolation and control of the membrane system including manual and automated valves with pneumatic actuators, check valves, and solenoid valves.
12	Filtrate air release systems.
1	Compressed air system to operate Evoqua supplied valves and leak testing with one air receiver and lead/lag rotary screw compressors.

CIP Chemical Dosing System Equipment

Qty.	Description
1	Sodium hypochlorite dosing system skid. Includes Two (2) dosing pumps and valves and instruments necessary for proper operation and calibration.
1	Citric acid dosing system skid. Includes One (1) dosing pump and valves and instruments necessary for proper operation and calibration.
1	Sulfuric acid dosing system skid. Includes One (1) dosing pump and valves and instruments necessary for proper operation and calibration.
1 lot	All valves and instruments necessary to monitor and control the CIP process, including: pneumatic valves, chemical injection quills, turbidimeter, pH probe analyzer, etc.

MBR Control System Equipment

Qty.	Description
1	Allen Bradley Compact Logix PLC.
1	Siemens touch screen Human Machine Interface (HMI) with compact flash data storage card.
1	Master Control Panel (MCP).
14	Slave Control Panels for O/I.
1	Remote monitoring system (i.e. Memlog). Includes modem, software, and hardware.
1 lot	Digital and Analog I/O (Input/Output) modules.

Field Service

An Evoqua Water Technologies Field Service Technician will be on site to supervise the installation, commissioning and start-up of the proposed MBR system and train operators.

General Items Not Included

General Items not Included
• Compliance permitting and approval (Federal, State and/or local).
• Detail shop fabrication drawings.
• Electrical, hydraulic, or pneumatic controls unless specifically noted.
• Engineering and supervision of all equipment and labor for civil works.
• Laboratory, shop, or field testing other than supervision of start-up testing.
• Taxes, bonds, fees, permits, lien waivers, licenses, etc.
• Tools or spare parts.
• Unloading of equipment and protected storage of equipment at jobsite.
• Utilities connections.
• Site amenities including high speed internet access
• Overall system commissioning management and supporting tradesman labor (e.g. electricians)
• Commissioning consumables
• Plant Building (membrane equipment requires protection from direct sunlight, rainfall and sub-zero temperatures)
• Earthworks, civil works, foundations, drainage, buried piping etc.
• Project specific drawings and documentation except as listed
• Installation of equipment
• Chemicals
• Safety showers and other personal protection equipment

Civil Works and Mechanical Items Not Included

Civil Works and Mechanical Items not Included
• Adhesives, adhesive dispensers, grout, mastic & anti-seize compounds.
• Anchor bolts and/or expansion anchors unless otherwise noted.
• Base slabs, equipment mounting pads, or shims.
• Concrete work of any sort, grout, mastic, sealing compounds, shims.
• Demolition, removal, or transfer of anything that is existing.
• Engineering, permitting, and surveying.
• Headworks Equipment (Grit removal and fine screen)
• Mixed liquor re-screening
• Biological system c/w ancillary equipment
• Effluent disinfection
• Disposal system for rinse and CIP waste
• Filtered water conditioning (if required) and storage
• Waste activated sludge (WAS) equipment or solids handling system.
• Equipment lifting hoists, cranes, or other lifting devices.
• Field surface preparation and/or painting.
• Floor grating, stairways, ladders, platforms, handrailing unless noted.
• Installation of equipment.
• Interconnecting materials external to enclosures such as cable, pressure taps, tubing, etc.
• Labor for field testing.
• Lubricants, grease piping, grease guns.
• Modifications to existing equipment or structures.

Civil Works and Mechanical Items not Included

- Access platforms
- Pipe supports and hangers for piping.
- Piping, pumps, valves, wall sleeves, gates, drains, weirs, baffles not mentioned.
- Plumbing associated with waste disposal, floor drains, and/or emergency and safety wash stations.
- PVC solvent weld materials.

Electrical Items Not Included

Electrical Items not Included

- Conduit or wiring in the field.
- Cable trays, fittings, and supports.
- Influent instrumentation including, but not limited to flowmeters, pH analyzers, temperature transmitters and/or pressure transducers.
- Instrumentation required for post treatment monitoring.
- Power to Evoqua supplied equipment.
- Motor control centers.
- Plant lighting.
- Supply and installation of building power, lighting, main service disconnects and control panels.
- Supply, installation and control of a remote telemetry system (SCADA) to monitor and control the operation of the system and overall plant operation other than offered.
- Underwriters Laboratory inspection of electrical controls.
- Variable frequency drives unless specifically noted.

Other Items Not Included

Other Items not Included

- Conduit or wiring in the field.
- Cable trays, fittings, and supports.
- Influent instrumentation including, but not limited to flowmeters, pH analyzers, temperature transmitters and/or pressure transducers.
- Instrumentation required for post treatment monitoring.
- Power to Siemens supplied equipment.
- Motor control centers.
- Plant lighting.
- Supply and installation of building power, lighting, main service disconnects and control panels.
- Supply, installation and control of a remote telemetry system (SCADA) to monitor and control the operation of the system and overall plant operation other than offered.
- Underwriters Laboratory inspection of electrical controls.
- Variable frequency drives unless specifically noted.

5 EVOQUA WATER TECHNOLOGIES LLC – STANDARD TERMS OF SALE

1. **Applicable Terms.** These terms govern the purchase and sale of equipment, products, related services, leased products, and media goods if any (collectively herein "Work"), referred to in Seller's proposal ("Seller's Documentation"). Whether these terms are included in an offer or an acceptance by Seller, such offer or acceptance is expressly conditioned on Buyer's assent to these terms. Seller rejects all additional or different terms in any of Buyer's forms or documents.
2. **Payment.** Buyer shall pay Seller the full purchase price as set forth in Seller's Documentation. Unless Seller's Documentation specifically provides otherwise, freight, storage, insurance and all taxes, levies, duties, tariffs, permits or license fees or other governmental charges relating to the Work or any incremental increases thereto shall be paid by Buyer. If Seller is required to pay any such charges, Buyer shall immediately reimburse Seller. If Buyer claims a tax or other exemption or direct payment permit, it shall provide Seller with a valid exemption certificate or permit and indemnify, defend and hold Seller harmless from any taxes, costs and penalties arising out of same. All payments are due within 30 days after receipt of invoice. Buyer shall be charged the lower of 1 ½% interest per month or the maximum legal rate on all amounts not received by the due date and shall pay all of Seller's reasonable costs (including attorneys' fees) of collecting amounts due but unpaid. All orders are subject to credit approval by Seller. Back charges without Seller's prior written approval shall not be accepted.
3. **Delivery.** Delivery of the Work shall be in material compliance with the schedule in Seller's Documentation. Unless Seller's Documentation provides otherwise, delivery terms are ExWorks Seller's factory (Incoterms 2010). Title to all Work shall pass upon receipt of payment for the Work under the respective invoice. Unless otherwise agreed to in writing by Seller, shipping dates are approximate only and Seller shall not be liable for any loss or expense (consequential or otherwise) incurred by Buyer or Buyer's customer if Seller fails to meet the specified delivery schedule.
4. **Ownership of Materials and Licenses.** All devices, designs (including drawings, plans and specifications), estimates, prices, notes, electronic data, software and other documents or information prepared or disclosed by Seller, and all related intellectual property rights, shall remain Seller's property. Seller grants Buyer a non-exclusive, non-transferable license to use any such material solely for Buyer's use of the Work. Buyer shall not disclose any such material to third parties without Seller's prior written consent. Buyer grants Seller a non-exclusive, non-transferable license to use Buyer's name and logo for marketing purposes, including but not limited to, press releases, marketing and promotional materials, and web site content.
5. **Changes.** Neither party shall implement any changes in the scope of Work described in Seller's Documentation without a mutually agreed upon change order. Any change to the scope of the Work, delivery schedule for the Work, any Force Majeure Event, any law, rule, regulation, order, code, standard or requirement which requires any change hereunder shall entitle Seller to an equitable adjustment in the price and time of performance.
6. **Force Majeure Event.** Neither Buyer nor Seller shall have any liability for any breach or delay (except for breach of payment obligations) caused by a Force Majeure Event. If a Force Majeure Event exceeds six (6) months in duration, the Seller shall have the right to terminate the Agreement without liability, upon fifteen (15) days written notice to Buyer, and shall be entitled to payment for work performed prior to the date of termination. "**Force Majeure Event**" shall mean events or circumstances that are beyond the affected party's control and could not reasonably have been easily avoided or overcome by the affected party and are not substantially attributable to the other party. Force Majeure Event may include, but is not limited to, the following circumstances or events: war, act of foreign enemies, terrorism, riot, strike, or lockout by persons other than by Seller or its sub-suppliers, natural catastrophes or (with respect to on-site work), unusual weather conditions.
7. **Warranty.** Subject to the following sentence, Seller warrants to Buyer that the (i) Work shall materially conform to the description in Seller's Documentation and shall be free from defects in material and workmanship and (ii) the Services shall be performed in a timely and workmanlike manner. Determination of suitability of treated water for any use by Buyer shall be the sole and exclusive responsibility of Buyer. The foregoing warranty shall not apply to any Work that is specified or otherwise demanded by Buyer and is not manufactured or selected by Seller, as to which (i) Seller hereby assigns to Buyer, to the extent assignable, any warranties made to Seller and (ii) Seller shall have no other liability to Buyer under warranty, tort or any other legal theory. The Seller warrants the Work, or any components thereof, through the earlier of (i) eighteen (18) months from delivery of the Work or (ii) twelve (12) months from initial operation of the Work or ninety (90) days from the performance of services (the "Warranty Period"). If Buyer gives Seller prompt written notice of breach of this warranty within the Warranty Period, Seller shall, at its sole option and as Buyer's sole and exclusive remedy, repair or replace the subject parts, re-perform the Service or refund the purchase price. Unless otherwise agreed to in writing by Seller, (i) Buyer shall be responsible for any labor required to gain access to the Work so that Seller can assess the available remedies and (ii) Buyer shall be responsible for all costs of installation of repaired or replaced Work. If Seller determines that any claimed breach is not, in fact, covered by this warranty, Buyer shall pay Seller its then customary charges for any repair or replacement made by Seller. Seller's warranty is conditioned on Buyer's (a) operating and maintaining the Work in accordance with Seller's instructions, (b) not making any

unauthorized repairs or alterations, and (c) not being in default of any payment obligation to Seller. Seller's warranty does not cover (i) damage caused by chemical action or abrasive material, misuse or improper installation (unless installed by Seller) and (ii) media goods (such as, but not limited to, resin, membranes, or granular activated carbon media) once media goods are installed. THE WARRANTIES SET FORTH IN THIS SECTION 7 AND THE WARRANTY SET FORTH IN THE "EXTENDED LOW PRESSURE MEMBRANE MODULE WARRANTY" SECTION OF EVOQUA'S PROPOSAL ARE THE SELLER'S SOLE AND EXCLUSIVE WARRANTIES AND ARE SUBJECT TO THE LIMITATION OF LIABILITY PROVISION BELOW. SELLER MAKES NO OTHER WARRANTIES OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE.

8. Indemnity. Seller shall indemnify, defend and hold Buyer harmless from any claim, cause of action or liability incurred by Buyer as a result of third party claims for personal injury, death or damage to tangible property, to the extent caused by Seller's negligence. Seller shall have the sole authority to direct the defense of and settle any indemnified claim. Seller's indemnification is conditioned on Buyer (a) promptly, within the Warranty Period, notifying Seller of any claim, and (b) providing reasonable cooperation in the defense of any claim.

9. Assignment. Neither party may assign this Agreement, in whole or in part, nor any rights or obligations hereunder without the prior written consent of the other party; provided, however, the Seller may assign its rights and obligations under these terms to its affiliates or in connection with the sale or transfer of the Seller's business and Seller may grant a security interest in the Agreement and/or assign proceeds of the agreement without Buyer's consent.

10. Termination. Either party may terminate this agreement, upon issuance of a written notice of breach and a thirty (30) day cure period, for a material breach (including but not limited to, filing of bankruptcy, or failure to fulfill the material obligations of this agreement). If Buyer suspends an order without a change order for ninety (90) or more days, Seller may thereafter terminate this Agreement without liability, upon fifteen (15) days written notice to Buyer, and shall be entitled to payment for work performed, whether delivered or undelivered, prior to the date of termination.

11. Dispute Resolution. Seller and Buyer shall negotiate in good faith to resolve any dispute relating hereto. If, despite good faith efforts, the parties are unable to resolve a dispute or claim arising out of or relating to this Agreement or its breach, termination, enforcement, interpretation or validity, the parties will first seek to agree on a forum for mediation to be held in a mutually agreeable site. If the parties are unable to resolve the dispute through mediation, then *any dispute, claim or controversy arising out of or relating to this Agreement or the breach, termination, enforcement, interpretation or validity thereof, including the determination of the scope or applicability of this agreement to arbitrate, shall be determined by arbitration in Pittsburgh, Pennsylvania before three arbitrators who are lawyers experienced in the discipline that is the subject of the dispute and shall be jointly selected by Seller and Buyer. The arbitration shall be administered by JAMS pursuant to its Comprehensive Arbitration Rules and Procedures. The Arbitrators shall issue a reasoned decision of a majority of the arbitrators, which shall be the decision of the panel. Judgment may be entered upon the arbitrators' decision in any court of competent jurisdiction. The substantially prevailing party as determined by the arbitrators shall be reimbursed by the other party for all costs, expenses and charges, including without limitation reasonable attorneys' fees, incurred by the prevailing party in connection with the arbitration. For any order shipped outside of the United States, any dispute shall be referred to and finally determined by the International Center for Dispute Resolution in accordance with the provisions of its International Arbitration Rules, enforceable under the New York Convention (Convention on the Recognition and Enforcement of Foreign Arbitral Awards) and the governing language shall be English.*

12. Export Compliance. Buyer acknowledges that Seller is required to comply with applicable export laws and regulations relating to the sale, exportation, transfer, assignment, disposal and usage of the Work provided under this Agreement, including any export license requirements. Buyer agrees that such Work shall not at any time directly or indirectly be used, exported, sold, transferred, assigned or otherwise disposed of in a manner which will result in non-compliance with such applicable export laws and regulations. It shall be a condition of the continuing performance by Seller of its obligations hereunder that compliance with such export laws and regulations be maintained at all times. BUYER AGREES TO INDEMNIFY AND HOLD SELLER HARMLESS FROM ANY AND ALL COSTS, LIABILITIES, PENALTIES, SANCTIONS AND FINES RELATED TO NON-COMPLIANCE WITH APPLICABLE EXPORT LAWS AND REGULATIONS.

13. LIMITATION OF LIABILITY. NOTWITHSTANDING ANYTHING ELSE TO THE CONTRARY, SELLER SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY CONSEQUENTIAL, INCIDENTAL, SPECIAL, PUNITIVE OR OTHER INDIRECT DAMAGES, AND SELLER'S TOTAL LIABILITY ARISING AT ANY TIME FROM THE SALE OR USE OF THE WORK, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY LIABILITY FOR ALL WARRANTY CLAIMS OR FOR ANY BREACH OR FAILURE TO PERFORM ANY OBLIGATION UNDER THE CONTRACT, SHALL NOT EXCEED THE PURCHASE PRICE PAID FOR THE WORK. THESE LIMITATIONS APPLY WHETHER THE LIABILITY IS BASED ON CONTRACT, TORT, STRICT LIABILITY OR ANY OTHER THEORY.

14. Rental Equipment / Services. Any leased or rented equipment ("Leased Equipment") provided by Seller shall at all times be the property of Seller with the exception of certain miscellaneous installation materials purchased by the Buyer, and no right or property interest is transferred to the Buyer, except the right to use any such Leased Equipment as provided herein. Buyer agrees that it shall not pledge, lend, or create a security interest in, part with possession of, or relocate the Leased Equipment. Buyer shall be responsible to maintain the Leased Equipment in good and efficient working order. At the end of the initial term specified in the order, the terms shall automatically renew for the identical period unless canceled in writing by Buyer or Seller not sooner than three (3) months nor later than one (1) month from termination of the initial order or any renewal terms. Upon any renewal, Seller shall have the right to issue notice of increased pricing which shall be effective for any renewed terms unless Buyer objects in writing within fifteen (15) days of issuance of said notice. If Buyer timely cancels service in writing prior to the end of the initial or any renewal term this shall not relieve Buyer of its obligations under the order for the monthly rental service charge which shall continue to be due and owing. Upon the expiration or termination of this Agreement, Buyer shall promptly make any Leased Equipment available to Seller for removal. Buyer hereby agrees that it shall grant Seller access to the Leased Equipment location and shall permit Seller to take possession of and remove the Leased Equipment without resort to legal process and hereby releases Seller from any claim or right of action for trespass or damages caused by reason of such entry and removal.

15. Miscellaneous. These terms, together with any Contract Documents issued or signed by the Seller, comprise the complete and exclusive statement of the agreement between the parties (the "Agreement") and supersede any terms contained in Buyer's documents, unless separately signed by Seller. No part of the Agreement may be changed or cancelled except by a written document signed by Seller and Buyer. No course of dealing or performance, usage of trade or failure to enforce any term shall be used to modify the Agreement. To the extent the Agreement is considered a subcontract under Buyer's prime contract with an agency of the United States government, in case of Federal Acquisition Regulations (FARs) flow down terms, Seller will be in compliance with Section 44.403 of the FAR relating to commercial items and those additional clauses as specifically listed in 52.244-6, Subcontracts for Commercial Items (OCT 2014). If any of these terms is unenforceable, such term shall be limited only to the extent necessary to make it enforceable, and all other terms shall remain in full force and effect. The Agreement shall be governed by the laws of the Commonwealth of Pennsylvania without regard to its conflict of laws provisions. Both Buyer and Seller reject the applicability of the United Nations Convention on Contracts for the international sales of goods to the relationship between the parties and to all transactions arising from said relationship.

6 EXTENDED LOW PRESSURE MEMBRANE MODULE WARRANTY

1. Term of the Membrane Module Warranty

- a. This Warranty shall commence ("Commencement Date") on the earlier of:
 - i) wet start up of the equipment, or
 - ii) 6 months after the delivery of the membrane modules to the Owner.
- b. This Warranty shall continue for a period of five (5) years from the Commencement Date (the "Module Warranty Period").

2. Repair and Replacement Conditions

- a. In the event an individual membrane module(s) exhibits defects in material or workmanship, as defined in Paragraph 2.b. below, the Seller shall, at its sole option and as the Owner's sole remedy, conduct either of the following:
 - i) Repair the membrane module at no cost to Owner; or
 - ii) Provide replacement membrane modules per the warranty replacement schedule listed in Paragraph 5 below.
- b. Membrane modules shall be deemed to be exhibiting defects in material or workmanship under the following conditions:
 - i) If the membrane module(s) fails Seller's standard integrity test for MBR and cannot be repaired by the Owner; or
 - ii) If the membrane module(s) fail to meet the filtrate flow capacity, as outlined in the Design Basis in the Contract Documents; or
 - iii) If the membrane module(s) cause the system to exceed the effluent turbidity and/or total suspended solids requirements for this project, as outlined in the Design Basis in the Contract Documents.
- c. Owner will return to Seller the end of each membrane module with the serial number to qualify for a replacement module.

3. Membrane Module Warranty Exclusions: The Owner recognizes that damage resulting from any of the following shall be excluded from coverage under the low pressure membrane module warranty:

- a. Any person other than an employee or representative of Seller has altered the membrane operating system without prior written approval by Seller;
- b. OWNER causing or permitting the membrane modules to dry or to have moisture content below that specified in the operating instructions either during storage or operation. Shutdown, storage, maintenance and start-up procedures of membranes must be as specified in the Operation & Maintenance Manual;
- c. Mixed liquor suspended solids concentration exceeding a maximum of 14,500 mg/L in the membrane tank;
- d. Unusual plant upsets, presence of other potential transients or other undefined operating conditions that can affect membrane performance or life. This includes but is not limited to polymer "dumps", fats, oil and grease content in excess of 100 mg/L entering the biological system, the use, malfunction or by-pass of any equipment which allows the accumulation of non-biodegradable material in the membrane tanks, any

bypass of the pre-screen ahead of the aeration basins and/or basket strainers on the membrane tank inlet, rags or debris that fall into the biological or membrane tanks, toxic wastes entering the plant that upset the biological process;

- e. Any damage/defect caused by chemical or physical conditions such as (but not limited to) pH, temperature, chemicals, effluent COD is greater than 50 mg/L or climatic factors outside the recommended operating parameters in the appropriate section of the Operation & Maintenance Manual;
- f. Any damage directly or indirectly related to PLC and/or HMI/SCADA modifications without Seller's express written consent.
- g. Improper maintenance or operation of equipment (including failure to perform periodic chemical cleans) as defined in Seller supplied operating and maintenance manual.
- h. Neutralization and/or reduction of chemical cleaning solutions are performed in the membrane tank without written authorization from Seller;
- i. Supply of influent water exhibiting parameters inconsistent with the parameters determined or specified at time of bid and/or pilot testing.
- j. Sludge retention time (SRT) is:
 - less than 4 days over a 2-day history; or
 - less than as determined by the equation below over any 30-day period:
$$\text{SRT} = 12 / 1.029^{(T-20)}$$

Where: SRT = minimum SRT for biological process (average for any 30-day period)

 T = wastewater temperature (°C); or
 - greater than 80 days over a 30-day period.

4. Warranty Conditions: This warranty is conditioned upon Owner:

- a. Not being in default of any payment obligations to Seller; and
- b. Maintaining hand-written or electronic operational logs and providing such logs to Seller in the event of a warranty claim.
- c. Unless the capillary suction time (CST) is less than 20 seconds for mixed liquor before the membrane tank, the CST method should be as defined in Standard Methods for the Examination of Wastewater Treatment (latest edition), except that a 10-mm diameter stainless steel reservoir should be utilized rather than an 18-mm diameter.

5. Warranty Replacement Schedule

- a. **First 12 Months:** If a membrane module shall require replacement under the repair and replacement conditions described in section 2 above during the first twelve (12) months of the "Module Warranty Period", a replacement will be supplied by Seller at no charge.
- b. **Next 48 Months:** If a low pressure membrane module shall require replacement under the repair and replacement conditions described in section 2 above during the next forty-eight (48) months of the Module

Warranty Period, a replacement will be supplied by Seller and invoiced based upon a pro-rata value of a total of sixty (60) months. The pro-rata value shall be determined using a replacement price of US\$1,850.00 per module adjusted by the increase in the North American Consumer Price Index (CPI) All Urban Consumers (US City Average), and reducing this price by 1/60th for each month remaining in the 60-month period.

- c. Replacement modules supplied by the Seller to Owner under warranty shall assume the balance of the membrane module warranty that remained on the defective membrane module that was replaced under warranty.
 - d. Freight costs associated with the furnishing of replacement modules provided under the membrane module warranty is not included in the warranty replacement price. Accordingly, the shipping/delivery terms for replacement modules supplied under the membrane module warranty shall be "Ex Works Seller's Facility" and Seller shall arrange, and Owner shall pay for, transportation of replacement membrane modules to Owner's facility.
6. IN NO EVENT SHALL SELLER BE LIABLE FOR ANY INDIRECT, CONSEQUENTIAL, INCIDENTAL, SPECIAL, PUNITIVE OR OTHER DAMAGES AND SELLER'S TOTAL LIABILITY UNDER THIS MEMBRANE MODULE WARRANTY, WHEN ADDED TO ALL LIABILITY OF SELLER TO THE OWNER AND ANY END USER OF THE SYSTEM, IF DIFFERENT FROM THE OWNER, UNDER THE SYSTEM SALE CONTRACT, SHALL NOT EXCEED THE LIMITATION ON LIABILITY SET FORTH IN THE SYSTEM SALE CONTRACT. THE FOREGOING LIMITATIONS APPLY REGARDLESS OF WHETHER THE LIABILITIES OR DAMAGES ARISE OR ARE ALLEGED TO ARISE UNDER CONTRACT, TORT, STRICT LIABILITY OR ANY OTHER THEORY. The Warranty is expressly excluded from any performance bond(s) which may be furnished by the Seller.

Anexo B-2: Cotización de la tecnología MBR (Etapa II)

Fuente: Evoqua, 2016b.

MemPulse™ Membrane Bioreactor System

PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)
LOS TAJOS
APRIL 8, 2016

BUDGETARY PROPOSAL NO. 16P1667MBR R1

Submitted to

Ing. Raily Solano Ramírez, AyA- Costa Rica



MEMCOR®
an eVOQUA brand

EXECUTIVE SUMMARY

Thank you for your interest in Evoqua Water Technologies' new MEMCOR® MemPulse MBR system. Our MBR technology uses the latest advances in filtration and biological treatment in a combination specifically designed to create highly efficient aeration in conjunction with effective nutrient control with the absolute barrier of membrane filtration. The MEMCOR MBR has several key advantages over both conventional treatment processes and other MBR membrane systems.

MemPulse™ Air Scour System

- The MemPulse air scour device reduces the amount of air required to scour the membranes significantly.
- With a simple device with no moving parts used to irregularly release pulses of air, operation and maintenance costs for the MemPulse system are significantly lower than other systems.

Small Footprint

- Evoqua unique rack arrangement and the elevated operating mixed liquor suspended solids concentrations, of MBR systems, allow for greatly reduce overall space requirement.
- The modular nature of the membrane modules enables the tanks to be configured in the space available.
- Due to the elevated mixed liquor suspended solids up to 10,000mg/L, the biological volume required is greater decreases, up to 70%, compared to secondary clarification.

Independent isolatable membrane tanks

Advanced Process

- The Title 22 approved membranes enable effluent from the Memcor membranes to meet the most demanding effluent requirements and can be designed to meet stringent permit requirements or beneficial reuse such as urban irrigation, cooling tower make water or indirect reuse.
- Evoqua can provide a process warranty for the entire treatment process, ensuring compatibility between the biological process and membrane filtration system, and providing a single source of responsibility for any issues with the system.

Minimizing Maintenance Requirements

- MemPulse™ provides uniform distribution of mixed liquor and air across the entire membrane tank ensuring a consistent mixed liquor environment for each sub-module preventing preferential fouling of membranes.



- Separate membrane tanks adjacent to the biological tanks provides the ability to independently control the membrane environment and biological process operations, allowing flexibility in operation.

Remote Monitoring

- Remote monitoring capability allows for real time analysis of critical system parameters to help troubleshoot and support local service people.
- Remote monitoring data logging system allows Evoqua process engineers to analyze system performance and optimize the system configuration for your specific application.

Service Capabilities

Evoqua combines our in-depth system knowledge with our extensive company owned service organization to provide you with qualified local personnel that can manage the preventive and on-going service needs of the proposed MBR system. Our service programs are individually designed to meet the needs of each customer situation. Our service programs can be designed to provide any of the following services:

- Remote data analysis with actionable summary reports
- Completion of on-site membrane clean-in-place procedures
- Treatment system audits and membrane fiber analysis
- Completion of preventive maintenance and parts replacement

We would like to thank you again for your interest in Evoqua's line of MEMCOR Products. We believe that every MEMCOR product comes with more than just equipment – it includes the expansive knowledge of MEMCOR's dedicated team of membrane scientists, engineers, and technicians who stand behind every installation. We are eager to share this expertise with those responsible for providing the world with clean, consistent, and high-quality water.

Should you have any questions regarding this quotation, or would like to request any additional information please contact the Technical Sales Manager listed below.

Evoqua Water Technologies LLC:

Orest Zacerkowny
Director of Sales, MEMCOR Products
Technical Sales Manager
Telephone: 724-612-8804
Facsimile: 978-323-0854
Orest.Zacerkowny@evoqua.com

TABLE OF CONTENTS

EXECUTIVE SUMMARY	2
1 Project Overview.....	5
2 Design Information.....	6
2.1 Influent flows	6
2.2 Influent Water Quality	6
2.3 Effluent Water Quality.....	6
3 Design Basis.....	7
3.1 System Design Basis	7
3.2 BioNutre™ Biological Design Information	8
3.2.1 Configuration Information.....	8
3.2.2 Biological Design Parameters	9
3.2.3 Biological System Information.....	9
3.2.4 Hydraulic Design Basis	9
3.3 Membrane Operating System Design	10
3.3.1 Membrane System Operation	11
3.3.2 Filtered Water Specification	12
4 MBR SCOPE OF SUPPLY.....	13
5 Evoqua Water Technologies LLC – Standard Terms of Sale	17
6 Extended Low Pressure Membrane Module Warranty	20

1 PROJECT OVERVIEW

The following table summarizes the contents of this quotation:

MEMCOR® Model:	18 x 1008B40N
BioNutre Biological System	Biological Blowers
6240 B40N Modules	Filtrate and Air Headers
Filtrate Pumping System	RAS Pumping System
Membrane System Blowers	Custom Tool Package
Warranties	O&M Manuals
Manufacturing Services (Commissioning and Training)	
Budgetary Proposal Price (Phase 2):	USD\$14,000,000

Please note that the above pricing is for expansion to Phase 2 (II Etapa) capacity assuming the Phase 1 (I Etapa) equipment is already in place.

Please note that the pricing above does not include insurance, bonds, or any applicable taxes.

The scope of supply and pricing are based on Evoqua's standard equipment selection, standard terms of sale and warranty terms as described herein. Any variations from these standards may affect this budgetary quotation. Additionally, please note that this budgetary quotation is for review and informational purposes only and does not constitute an offer for acceptance.

Payment Terms:

10% on Order, net 30
 15% on Engineering Submittals, staged submittals allowed, net 30
 25% on Order of major rotating equipment, net 30
 45% on Delivery, partial deliveries accepted, net 30
 5% on Start-up, net 30
 Full payment not to exceed 120 days after shipment

Equipment Delivery:

Estimated 26 weeks after receipt of full information and approved drawings when required.

Shipments:

Three (3) sets of submittal drawings, if required, will be issued approximately 12 weeks after receipt and approval of purchase order.

Submittals:

Three (3) sets of submittal drawings, if required, will be issued approximately 12 weeks after receipt and approval of purchase order.

2 DESIGN INFORMATION

The proposed MBR system is sized to provide consistent filtrate quality based upon the hydraulic and feed water characteristics specified below.

2.1 Influent flows

Hydraulic Conditions	Phase 1	Phase 2	Units
Average Daily Flow	10,116	15,336	m ³ /h
Maximum Month Flow	Not Specified	Not Specified	
Peak Week Flow	Not Specified	Not Specified	
Peak Daily Flow	12,420	18,792	m ³ /h
Peak Instantaneous Flow*	17,496	26,460	m ³ /h
Minimum Daily Flow	Not Specified	Not Specified	

2.2 Influent Water Quality

Influent Water Quality	Average	Min	Max	Units
Biochemical Oxygen Demand (BOD ₅)	270	63	420	milligrams/liter (mg/L)
Chemical Oxygen Demand (COD)	675	*	*	mg/L
Total Suspended Solids (TSS)	290	47	712	mg/L
Ammonia Nitrogen (NH ₃ -N)	*	*	*	mg/L
Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)	46	*	*	mg/L
Total Phosphorus	4	*	*	mg/L
Alkalinity	*	*	*	mg/L as CaCO ₃
Fats, Oils & Grease (FOG), Freon extractable	*	*	*	mg/L
Influent Temperature	22.6	21.6	23.8	degrees Celsius (oC)

Notes:

- (1) * Denotes a value which was not specified in the RFQ. All values must be confirmed for any associated process guarantee and membrane warranty.

2.3 Effluent Water Quality

Effluent Water Quality	Value	Units
BOD ₅	<30	mg/L
COD	None	mg/L
Total Suspended Solids	<30	mg/L
Total Nitrogen	None	mg/L
Total Phosphorus	None	mg/L
Turbidity	None	NTU

3 DESIGN BASIS

The Membrane Operating System (MOS) has been designed around the following parameters.

3.1 System Design Basis

Design Parameter	Value
Membrane Pre-Screening	< 1.5 mm perforated System designed to prevent screen bypass under all conditions
Grit Removal	> 95 % of particles > 150 micron @ SG = 2.0 > 95 % of particles 100 micron, @ SG = 2.6 > 50 % of particles 100-150 micron @ SG = 2.6 Removal efficiency shall meet or exceed these values across a flow range of 25 - 100 % of PHF. System designed to prevent Grit removal bypass under all conditions
Raw Sewage	>90% Municipal
ML Capillary Suction Time (CST)	< 50 seconds
Sludge Retention Time (SRT)	10 days to 22 days
Raw Sewage: Fats, Oils and Greases (FOG) Hydrocarbons	< 80 mg/L < 5 mg/L
MLSS Temperature Range	10 – 25° C
Site Elevation	~1200 meters above MSL
Effluent Soluble BOD ₅	< 5 mg/L
Effluent Ammonia	< 1 mg/L
Coagulant Addition	Aluminum Sulfate ≤ 50 mg/L
Biological Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)	4,000 to 8,500 mg/L
Biological Seed Screening	Through membrane pre-screen or temporary screen of < 1 mm perforated plate or 0.75 mm mesh
Filtrate Pump and Pipework Design	> 65 kPa TMP
Bioreactor Foam / Scum Removal	Required Foam / scum removal to be carried out to control coverage to < 30 % of surface area
Bioreactor Waste Streams	WAS and grit dewatering system/s to achieve 95 % removal of > 50 um particles. Scum / Foam to be discharged to WAS dewatering system. Supernatant returned to the headworks prior to grit removal
CIP Waste Disposal	Return to influent balance tank

Notes

- (1) Any additional requirement for neutralization to be decided during detailed design.
- (2) If the wastewater alkalinity is less than the Table value, supplemental alkalinity may be required to ensure the pH does not inhibit bacterium growth.

- (3) Inhibitory Matter and Heavy Metals must be less than the threshold limits (or within any ranges specified), as defined on page 227 of WPCF Manual of Practice No. 8, 1977 Edition (See Appendix II) The wastewater shall also be free of any substance toxic or inhibitory to the biological treatment process as determined by treatability tests using Method 302B; OECD Guideline for Testing of Chemicals, Adopted 17 July 1992 or International Organization of Standardization, Evaluation of the Ultimate Aerobic Biodegradability of Organic Compounds, ISO/DIS 7827, IOS, Washington, D.C, 1983.

3.2 BioNutre™ Biological Design Information

The following sections outline the design basis for the biological system. The parameters detailed below are based on max month flow conditions and the average wastewater concentrations outlined above in this proposal. Note that these design parameters are for Phase 2 (II Etapa). For information on Phase 1, please refer to the budgetary proposal sent on February 17, 2016.

For the purposes of comparison, the Phase 2 design is 1.5x the Phase 1 design. So the four (4) trains of bioreactors (four parallel trains of four tanks each) becomes six (6) trains. The same applies to the Membrane Operating System (MOS). In Phase 1 there were twelve (12) tanks, and in Phase 2 there are eighteen (18) tanks.

3.2.1 Configuration Information

The proposed biological system is designed with an aerated anoxic zone and two aerobic tanks. EWT has extensive experience with this arrangement, which we feel provides superior performance and flexibility when coupled with EWT's biological treatment expertise and controls architecture.

System Configuration	Trains
Number of Parallel Aeration Trains	6
Number of Tanks per train	4

The adjacent tanks use common intermediate walls with the following tank configuration. The proposed configuration of each train is:

Tank	Quantity /Train	Length (m)	Width (m)	SWD (m)	Volume (meters ³)	% Volume	HRT (hours)
Aerated Anoxic 1 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Aerated Anoxic 2 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Aerobic 2 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Aerobic 2 (Fine Bubble)	1	36.6	27.4	6.1	6,116	25.00%	2.42
Total					24,466	100.00%	9.67

3.2.2 Biological Design Parameters

The following design parameters were used as the basis of design for sizing the proposed biological system.

Design Parameters	Value	Units
Mixed Liquor Suspended Solids (MLSS)	5,500	mg/L
Organic Loading Rate	0.67	kg/m ³ /d
Solids Retention Time (SRT)	9	d
Return Sludge Pumping Rate	250	% of ADF
Sludge Yield	0.92	
Biosolids Produced	60,276	kg/d

3.2.3 Biological System Information

Reactor	Volume Split	AOR Split	DO, mg/L	Diffuser AOR (lb/hr)	FCF Diffusers (AOR/SOR)	Diffuser SOR (lb/hr)
Aerated Anoxic 1 (Fine Bubble)	25.0%	20.2%	0.0	161.22	0.27	599.05
Aerated Anoxic 2 (Fine Bubble)	25.0%	22.9%	0.2	214.12	0.36	599.38
Aerobic 1 (Fine Bubble)	25.0%	27.1%	1.0	253.26	0.42	598.36
Aerobic 2 (Fine Bubble)	25.0%	29.9%	2.0	280.03	0.47	598.56
Total	100.0%	100.0%		908.6		2395.4

Reactor	No. of Diffusers	Design SCFM per Diffuser	Max SCFM per Diffuser
Aerated Anoxic 1 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1
Aerated Anoxic 2 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1
Aerobic 1 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1
Aerobic 2 (Fine Bubble)	2160	2.5	5.1

3.2.4 Hydraulic Design Basis

The hydraulic design capacities for the designs presented in this proposal are listed below:

Design Conditions	Flow	Units	Continuous Duration	Maximum Duration
Average Daily Flow (ADF)	10,116	m ³ /h	365 consecutive days	N/A
Max Month Average Day Flow (MMADF)	12,500	m ³ /h	30 consecutive days	30 consecutive days
Maximum Day Flow (MDF) One Tank Offline	12,500	m ³ /h	48 hours	140 hrs in 30 days

Note

1. Flow Condition for RFI can be sustain continuously at the flux specified in the RFI.
2. Average Day Flow (ADF): this is the average flow for the plant measured on monthly basis. If flow is grater Diurnal Peak Flow for > 3 hrs per day a chlorine MW is required.
3. After all Peak Flow events; Peak Week, Peak Day, Peak Hour the filtrate flow will be returned to Average Day Flow for an equivalent period to that of the peak flow period before entering another peak flow operation.
4. After any Peak Day Flow and Peak Hour Flow Events, a chlorine Maintenance Clean is required.

3.3 Membrane Operating System Design

This section outlines the design basis for the MemPulse™ membrane system.

Design Criteria	Value	Units
Module Type	B40N + MemPulse™	
Modules per Rack	16	
Weight of Wet Rack Assembly ¹	600	Kg
Weight of Fouled Rack Assembly ¹	850	Kg
Total Number of Membrane Tanks	18	
Number of Racks per Tank (installed)	63	
Spare Racks Slots per Tank	2	
No. of modules installed per Tank	1008	
Membrane Area per Tank	37,901	m ²
Tank Length	4.1	m
Tank Width	23.5	m
Tank Depth (top of concrete)	3.2	m
Tank Weir Depth	2.5	m

¹ Weight provided includes weight of spreader bar.

3.3.1 Membrane System Operation

Design Fluxes				
	ADF	PDF	PHF	Units
Flow Condition	368	451	635	MLD
No. of Membrane Tanks in Operation	18	18	18	—
No. of membrane Tanks in Standby	0	0	0	—
Net Flux	22.5	27.6	38.8	lmh
Net Flux (temperature-corrected)	22.5	27.6	38.9	lmh
Instantaneous Flux	24.6	30.1	42.2	lmh
Instantaneous Flux (temperature-corrected)	24.6	30.2	42.3	lmh

Mixed Liquor Feed Flow Requirements MBR				
	ADF	PDF	PHF	Units
Max MLSS Concentration in the Membrane Tank	7,700	7,700	7,700	mg/L
Total Mixed Liquor Feed Flow Required	53,681	65,771	92,604	m ³ /h

Air Scour Requirements				
Avg. Air Flow per Tank	4036 Nm ³ /h (0°C)	Avg. Discharge Pressure	31.6 kPag	

The following table summarizes the maintenance procedures to ensure optimal performance of the MemPulse™ membrane system at average dry weather flow (ADWF).

Parameter	Relaxation	Maintenance Clean	Sodium Hypochlorite CIP	Citric Acid / Sulfuric Acid CIP
Interval Between Cycle	12 min	7 days	90 days	180 days
Cleaning Cycle Duration	60 sec	50 min	480 min	480 min

3.3.2 Filtered Water Specification

The equipment offered will provide the following “Filtered Water” quality:

Parameter	Units	Quality (90 % ile) ¹	Quality (Maximum) ¹
Suspended Solids	mg/L	≤ 5	N/S
Turbidity	NTU	≤ 0.2	0.5
Bacteria ²	Log Removal	≥ 4	N/A
Virus ²	Log Removal	≥ 2.0	N/A

Note

1. Sufficient samples to be taken such that two or more non-conforming results are required to demonstrate non-conformance.
2. As measured by filtrate turbidity.

Please find the *MemPulse™ Membrane Bioreactor (MBR) System* brochure and *MEMCOR® B40N Membrane Filtration Module Specification* sheet attached with this proposal.

4 MBR SCOPE OF SUPPLY

The following equipment is proposed to expand from the Phase 1 (I Etapa) to Phase 2 (II Etapa) design flows. This equipment represents the additional equipment necessary to expand, not the total equipment sizing.

Biological Process Equipment

Qty.	Description
17,280	Fine bubble diffusers.
4	ORP Probe.
4	DO Probe.
8	Mounting Kits for Probes.
4	Controller for Probes.
16	Butterfly valves.
4	Blower discharge valves.
4	Blower discharge pressure transmitter.
4	Blowers.

Membrane Operating System Equipment

Qty.	Description
6,240	B40N membrane submodules fabricated of oxidant-resistant polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane material.
6,240	MemPulse™ devices.
390	Rack assembly (16 module capacity) consisting of header assemblies, guide racks, mixing skirt, and air dropper tube.
6 Lot	Stainless Steel Cell kit for mounting racks.
6	Centrifugal filtrate suction pump controlled by Variable Frequency Drive. One (1) per tank.
6	Centrifugal mixed liquor RAS pump designed to return the mixed liquor from the membrane tanks. One (1) per tank.
6	Positive displacement membrane air scour blower designed to meet average and peak air flow requirements. One (1) per tank.
1 lot	Instrumentation integral to monitor and control the membrane system including level transmitters, level switches, flow meters, pressure transmitters, and pressure gauges.
6	Turbidimeter to measure the turbidity of the filtrate from each membrane tank.
6 lot	Valves required for equipment isolation and control of the membrane system including manual and automated valves with pneumatic actuators, check valves, and solenoid valves.
6	Filtrate air release systems.

CIP Chemical Dosing System Equipment

Qty.	Description
1	Sodium hypochlorite dosing system skid. Includes Two (2) dosing pumps and valves and instruments necessary for proper operation and calibration.
1	Citric acid dosing system skid. Includes One (1) dosing pump and valves and instruments necessary for proper operation and calibration.
1	Sulfuric acid dosing system skid. Includes One (1) dosing pump and valves and instruments necessary for proper operation and calibration.
1 lot	All valves and instruments necessary to monitor and control the CIP process, including: pneumatic valves, chemical injection quills, turbidimeter, pH probe analyzer, etc.

MBR Control System Equipment

Qty.	Description
6	Slave Control Panels for O/I.
1 lot	Digital and Analog I/O (Input/Output) modules.

Field Service

An Evoqua Water Technologies Field Service Technician will be on site to supervise the installation, commissioning and start-up of the proposed MBR system and train operators.

General Items Not Included

General Items not Included
• Compliance permitting and approval (Federal, State and/or local).
• Detail shop fabrication drawings.
• Electrical, hydraulic, or pneumatic controls unless specifically noted.
• Engineering and supervision of all equipment and labor for civil works.
• Laboratory, shop, or field testing other than supervision of start-up testing.
• Taxes, bonds, fees, permits, lien waivers, licenses, etc.
• Tools or spare parts.
• Unloading of equipment and protected storage of equipment at jobsite.
• Utilities connections.
• Site amenities including high speed internet access
• Overall system commissioning management and supporting tradesman labor (e.g. electricians)
• Commissioning consumables
• Plant Building (membrane equipment requires protection from direct sunlight, rainfall and sub-zero temperatures)
• Earthworks, civil works, foundations, drainage, buried piping etc.
• Project specific drawings and documentation except as listed
• Installation of equipment
• Chemicals
• Safety showers and other personal protection equipment

Civil Works and Mechanical Items Not Included

Civil Works and Mechanical Items not Included
• Adhesives, adhesive dispensers, grout, mastic & anti-seize compounds.
• Anchor bolts and/or expansion anchors unless otherwise noted.
• Base slabs, equipment mounting pads, or shims.
• Concrete work of any sort, grout, mastic, sealing compounds, shims.
• Demolition, removal, or transfer of anything that is existing.
• Engineering, permitting, and surveying.
• Headworks Equipment (Grit removal and fine screen)
• Mixed liquor re-screening
• Biological system c/w ancillary equipment
• Effluent disinfection
• Disposal system for rinse and CIP waste
• Filtered water conditioning (if required) and storage
• Waste activated sludge (WAS) equipment or solids handling system.
• Equipment lifting hoists, cranes, or other lifting devices.
• Field surface preparation and/or painting.
• Floor grating, stairways, ladders, platforms, handrailing unless noted.
• Installation of equipment.
• Interconnecting materials external to enclosures such as cable, pressure taps, tubing, etc.
• Labor for field testing.
• Lubricants, grease piping, grease guns.
• Modifications to existing equipment or structures.

Civil Works and Mechanical Items not Included

- Access platforms
- Pipe supports and hangers for piping.
- Piping, pumps, valves, wall sleeves, gates, drains, weirs, baffles not mentioned.
- Plumbing associated with waste disposal, floor drains, and/or emergency and safety wash stations.
- PVC solvent weld materials.

Electrical Items Not Included

Electrical Items not Included

- Conduit or wiring in the field.
- Cable trays, fittings, and supports.
- Influent instrumentation including, but not limited to flowmeters, pH analyzers, temperature transmitters and/or pressure transducers.
- Instrumentation required for post treatment monitoring.
- Power to Evoqua supplied equipment.
- Motor control centers.
- Plant lighting.
- Supply and installation of building power, lighting, main service disconnects and control panels.
- Supply, installation and control of a remote telemetry system (SCADA) to monitor and control the operation of the system and overall plant operation other than offered.
- Underwriters Laboratory inspection of electrical controls.
- Variable frequency drives unless specifically noted.

Other Items Not Included

Other Items not Included

- Conduit or wiring in the field.
- Cable trays, fittings, and supports.
- Influent instrumentation including, but not limited to flowmeters, pH analyzers, temperature transmitters and/or pressure transducers.
- Instrumentation required for post treatment monitoring.
- Power to Siemens supplied equipment.
- Motor control centers.
- Plant lighting.
- Supply and installation of building power, lighting, main service disconnects and control panels.
- Supply, installation and control of a remote telemetry system (SCADA) to monitor and control the operation of the system and overall plant operation other than offered.
- Underwriters Laboratory inspection of electrical controls.
- Variable frequency drives unless specifically noted.

5 EVOQUA WATER TECHNOLOGIES LLC – STANDARD TERMS OF SALE

1. **Applicable Terms.** These terms govern the purchase and sale of equipment, products, related services, leased products, and media goods if any (collectively herein "Work"), referred to in Seller's proposal ("Seller's Documentation"). Whether these terms are included in an offer or an acceptance by Seller, such offer or acceptance is expressly conditioned on Buyer's assent to these terms. Seller rejects all additional or different terms in any of Buyer's forms or documents.
2. **Payment.** Buyer shall pay Seller the full purchase price as set forth in Seller's Documentation. Unless Seller's Documentation specifically provides otherwise, freight, storage, insurance and all taxes, levies, duties, tariffs, permits or license fees or other governmental charges relating to the Work or any incremental increases thereto shall be paid by Buyer. If Seller is required to pay any such charges, Buyer shall immediately reimburse Seller. If Buyer claims a tax or other exemption or direct payment permit, it shall provide Seller with a valid exemption certificate or permit and indemnify, defend and hold Seller harmless from any taxes, costs and penalties arising out of same. All payments are due within 30 days after receipt of invoice. Buyer shall be charged the lower of 1 ½% interest per month or the maximum legal rate on all amounts not received by the due date and shall pay all of Seller's reasonable costs (including attorneys' fees) of collecting amounts due but unpaid. All orders are subject to credit approval by Seller. Back charges without Seller's prior written approval shall not be accepted.
3. **Delivery.** Delivery of the Work shall be in material compliance with the schedule in Seller's Documentation. Unless Seller's Documentation provides otherwise, delivery terms are ExWorks Seller's factory (Incoterms 2010). Title to all Work shall pass upon receipt of payment for the Work under the respective invoice. Unless otherwise agreed to in writing by Seller, shipping dates are approximate only and Seller shall not be liable for any loss or expense (consequential or otherwise) incurred by Buyer or Buyer's customer if Seller fails to meet the specified delivery schedule.
4. **Ownership of Materials and Licenses.** All devices, designs (including drawings, plans and specifications), estimates, prices, notes, electronic data, software and other documents or information prepared or disclosed by Seller, and all related intellectual property rights, shall remain Seller's property. Seller grants Buyer a non-exclusive, non-transferable license to use any such material solely for Buyer's use of the Work. Buyer shall not disclose any such material to third parties without Seller's prior written consent. Buyer grants Seller a non-exclusive, non-transferable license to use Buyer's name and logo for marketing purposes, including but not limited to, press releases, marketing and promotional materials, and web site content.
5. **Changes.** Neither party shall implement any changes in the scope of Work described in Seller's Documentation without a mutually agreed upon change order. Any change to the scope of the Work, delivery schedule for the Work, any Force Majeure Event, any law, rule, regulation, order, code, standard or requirement which requires any change hereunder shall entitle Seller to an equitable adjustment in the price and time of performance.
6. **Force Majeure Event.** Neither Buyer nor Seller shall have any liability for any breach or delay (except for breach of payment obligations) caused by a Force Majeure Event. If a Force Majeure Event exceeds six (6) months in duration, the Seller shall have the right to terminate the Agreement without liability, upon fifteen (15) days written notice to Buyer, and shall be entitled to payment for work performed prior to the date of termination. "**Force Majeure Event**" shall mean events or circumstances that are beyond the affected party's control and could not reasonably have been easily avoided or overcome by the affected party and are not substantially attributable to the other party. Force Majeure Event may include, but is not limited to, the following circumstances or events: war, act of foreign enemies, terrorism, riot, strike, or lockout by persons other than by Seller or its sub-suppliers, natural catastrophes or (with respect to on-site work), unusual weather conditions.
7. **Warranty.** Subject to the following sentence, Seller warrants to Buyer that the (i) Work shall materially conform to the description in Seller's Documentation and shall be free from defects in material and workmanship and (ii) the Services shall be performed in a timely and workmanlike manner. Determination of suitability of treated water for any use by Buyer shall be the sole and exclusive responsibility of Buyer. The foregoing warranty shall not apply to any Work that is specified or otherwise demanded by Buyer and is not manufactured or selected by Seller, as to which (i) Seller hereby assigns to Buyer, to the extent assignable, any warranties made to Seller and (ii) Seller shall have no other liability to Buyer under warranty, tort or any other legal theory. The Seller warrants the Work, or any components thereof, through the earlier of (i) eighteen (18) months from delivery of the Work or (ii) twelve (12) months from initial operation of the Work or ninety (90) days from the performance of services (the "Warranty Period"). If Buyer gives Seller prompt written notice of breach of this warranty within the Warranty Period, Seller shall, at its sole option and as Buyer's sole and exclusive remedy, repair or replace the subject parts, re-perform the Service or refund the purchase price. Unless otherwise agreed to in writing by Seller, (i) Buyer shall be responsible for any labor required to gain access to the Work so that Seller can assess the available remedies and (ii) Buyer shall be responsible for all costs of installation of repaired or replaced Work. If Seller determines that any claimed breach is not, in fact, covered by this warranty, Buyer shall pay Seller its then customary charges for any repair or replacement made by Seller. Seller's warranty is conditioned on Buyer's (a) operating and maintaining the Work in accordance with Seller's instructions, (b) not making any

unauthorized repairs or alterations, and (c) not being in default of any payment obligation to Seller. Seller's warranty does not cover (i) damage caused by chemical action or abrasive material, misuse or improper installation (unless installed by Seller) and (ii) media goods (such as, but not limited to, resin, membranes, or granular activated carbon media) once media goods are installed. THE WARRANTIES SET FORTH IN THIS SECTION 7 AND THE WARRANTY SET FORTH IN THE "EXTENDED LOW PRESSURE MEMBRANE MODULE WARRANTY" SECTION OF EVOQUA'S PROPOSAL ARE THE SELLER'S SOLE AND EXCLUSIVE WARRANTIES AND ARE SUBJECT TO THE LIMITATION OF LIABILITY PROVISION BELOW. SELLER MAKES NO OTHER WARRANTIES OF ANY KIND, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION, ANY WARRANTY OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR PURPOSE.

8. Indemnity. Seller shall indemnify, defend and hold Buyer harmless from any claim, cause of action or liability incurred by Buyer as a result of third party claims for personal injury, death or damage to tangible property, to the extent caused by Seller's negligence. Seller shall have the sole authority to direct the defense of and settle any indemnified claim. Seller's indemnification is conditioned on Buyer (a) promptly, within the Warranty Period, notifying Seller of any claim, and (b) providing reasonable cooperation in the defense of any claim.

9. Assignment. Neither party may assign this Agreement, in whole or in part, nor any rights or obligations hereunder without the prior written consent of the other party; provided, however, the Seller may assign its rights and obligations under these terms to its affiliates or in connection with the sale or transfer of the Seller's business and Seller may grant a security interest in the Agreement and/or assign proceeds of the agreement without Buyer's consent.

10. Termination. Either party may terminate this agreement, upon issuance of a written notice of breach and a thirty (30) day cure period, for a material breach (including but not limited to, filing of bankruptcy, or failure to fulfill the material obligations of this agreement). If Buyer suspends an order without a change order for ninety (90) or more days, Seller may thereafter terminate this Agreement without liability, upon fifteen (15) days written notice to Buyer, and shall be entitled to payment for work performed, whether delivered or undelivered, prior to the date of termination.

11. Dispute Resolution. Seller and Buyer shall negotiate in good faith to resolve any dispute relating hereto. If, despite good faith efforts, the parties are unable to resolve a dispute or claim arising out of or relating to this Agreement or its breach, termination, enforcement, interpretation or validity, the parties will first seek to agree on a forum for mediation to be held in a mutually agreeable site. If the parties are unable to resolve the dispute through mediation, then *any dispute, claim or controversy arising out of or relating to this Agreement or the breach, termination, enforcement, interpretation or validity thereof, including the determination of the scope or applicability of this agreement to arbitrate, shall be determined by arbitration in Pittsburgh, Pennsylvania before three arbitrators who are lawyers experienced in the discipline that is the subject of the dispute and shall be jointly selected by Seller and Buyer. The arbitration shall be administered by JAMS pursuant to its Comprehensive Arbitration Rules and Procedures. The Arbitrators shall issue a reasoned decision of a majority of the arbitrators, which shall be the decision of the panel. Judgment may be entered upon the arbitrators' decision in any court of competent jurisdiction. The substantially prevailing party as determined by the arbitrators shall be reimbursed by the other party for all costs, expenses and charges, including without limitation reasonable attorneys' fees, incurred by the prevailing party in connection with the arbitration. For any order shipped outside of the United States, any dispute shall be referred to and finally determined by the International Center for Dispute Resolution in accordance with the provisions of its International Arbitration Rules, enforceable under the New York Convention (Convention on the Recognition and Enforcement of Foreign Arbitral Awards) and the governing language shall be English.*

12. Export Compliance. Buyer acknowledges that Seller is required to comply with applicable export laws and regulations relating to the sale, exportation, transfer, assignment, disposal and usage of the Work provided under this Agreement, including any export license requirements. Buyer agrees that such Work shall not at any time directly or indirectly be used, exported, sold, transferred, assigned or otherwise disposed of in a manner which will result in non-compliance with such applicable export laws and regulations. It shall be a condition of the continuing performance by Seller of its obligations hereunder that compliance with such export laws and regulations be maintained at all times. BUYER AGREES TO INDEMNIFY AND HOLD SELLER HARMLESS FROM ANY AND ALL COSTS, LIABILITIES, PENALTIES, SANCTIONS AND FINES RELATED TO NON-COMPLIANCE WITH APPLICABLE EXPORT LAWS AND REGULATIONS.

13. LIMITATION OF LIABILITY. NOTWITHSTANDING ANYTHING ELSE TO THE CONTRARY, SELLER SHALL NOT BE LIABLE FOR ANY CONSEQUENTIAL, INCIDENTAL, SPECIAL, PUNITIVE OR OTHER INDIRECT DAMAGES, AND SELLER'S TOTAL LIABILITY ARISING AT ANY TIME FROM THE SALE OR USE OF THE WORK, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY LIABILITY FOR ALL WARRANTY CLAIMS OR FOR ANY BREACH OR FAILURE TO PERFORM ANY OBLIGATION UNDER THE CONTRACT, SHALL NOT EXCEED THE PURCHASE PRICE PAID FOR THE WORK. THESE LIMITATIONS APPLY WHETHER THE LIABILITY IS BASED ON CONTRACT, TORT, STRICT LIABILITY OR ANY OTHER THEORY.

14. Rental Equipment / Services. Any leased or rented equipment ("Leased Equipment") provided by Seller shall at all times be the property of Seller with the exception of certain miscellaneous installation materials purchased by the Buyer, and no right or property interest is transferred to the Buyer, except the right to use any such Leased Equipment as provided herein. Buyer agrees that it shall not pledge, lend, or create a security interest in, part with possession of, or relocate the Leased Equipment. Buyer shall be responsible to maintain the Leased Equipment in good and efficient working order. At the end of the initial term specified in the order, the terms shall automatically renew for the identical period unless canceled in writing by Buyer or Seller not sooner than three (3) months nor later than one (1) month from termination of the initial order or any renewal terms. Upon any renewal, Seller shall have the right to issue notice of increased pricing which shall be effective for any renewed terms unless Buyer objects in writing within fifteen (15) days of issuance of said notice. If Buyer timely cancels service in writing prior to the end of the initial or any renewal term this shall not relieve Buyer of its obligations under the order for the monthly rental service charge which shall continue to be due and owing. Upon the expiration or termination of this Agreement, Buyer shall promptly make any Leased Equipment available to Seller for removal. Buyer hereby agrees that it shall grant Seller access to the Leased Equipment location and shall permit Seller to take possession of and remove the Leased Equipment without resort to legal process and hereby releases Seller from any claim or right of action for trespass or damages caused by reason of such entry and removal.

15. Miscellaneous. These terms, together with any Contract Documents issued or signed by the Seller, comprise the complete and exclusive statement of the agreement between the parties (the "Agreement") and supersede any terms contained in Buyer's documents, unless separately signed by Seller. No part of the Agreement may be changed or cancelled except by a written document signed by Seller and Buyer. No course of dealing or performance, usage of trade or failure to enforce any term shall be used to modify the Agreement. To the extent the Agreement is considered a subcontract under Buyer's prime contract with an agency of the United States government, in case of Federal Acquisition Regulations (FARs) flow down terms, Seller will be in compliance with Section 44.403 of the FAR relating to commercial items and those additional clauses as specifically listed in 52.244-6, Subcontracts for Commercial Items (OCT 2014). If any of these terms is unenforceable, such term shall be limited only to the extent necessary to make it enforceable, and all other terms shall remain in full force and effect. The Agreement shall be governed by the laws of the Commonwealth of Pennsylvania without regard to its conflict of laws provisions. Both Buyer and Seller reject the applicability of the United Nations Convention on Contracts for the international sales of goods to the relationship between the parties and to all transactions arising from said relationship.

6 EXTENDED LOW PRESSURE MEMBRANE MODULE WARRANTY

1. Term of the Membrane Module Warranty

- a. This Warranty shall commence ("Commencement Date") on the earlier of:
 - i) wet start up of the equipment, or
 - ii) 6 months after the delivery of the membrane modules to the Owner.
- b. This Warranty shall continue for a period of five (5) years from the Commencement Date (the "Module Warranty Period").

2. Repair and Replacement Conditions

- a. In the event an individual membrane module(s) exhibits defects in material or workmanship, as defined in Paragraph 2.b. below, the Seller shall, at its sole option and as the Owner's sole remedy, conduct either of the following:
 - i) Repair the membrane module at no cost to Owner; or
 - ii) Provide replacement membrane modules per the warranty replacement schedule listed in Paragraph 5 below.
- b. Membrane modules shall be deemed to be exhibiting defects in material or workmanship under the following conditions:
 - i) If the membrane module(s) fails Seller's standard integrity test for MBR and cannot be repaired by the Owner; or
 - ii) If the membrane module(s) fail to meet the filtrate flow capacity, as outlined in the Design Basis in the Contract Documents; or
 - iii) If the membrane module(s) cause the system to exceed the effluent turbidity and/or total suspended solids requirements for this project, as outlined in the Design Basis in the Contract Documents.
- c. Owner will return to Seller the end of each membrane module with the serial number to qualify for a replacement module.

3. Membrane Module Warranty Exclusions: The Owner recognizes that damage resulting from any of the following shall be excluded from coverage under the low pressure membrane module warranty:

- a. Any person other than an employee or representative of Seller has altered the membrane operating system without prior written approval by Seller;
- b. OWNER causing or permitting the membrane modules to dry or to have moisture content below that specified in the operating instructions either during storage or operation. Shutdown, storage, maintenance and start-up procedures of membranes must be as specified in the Operation & Maintenance Manual;
- c. Mixed liquor suspended solids concentration exceeding a maximum of 14,500 mg/L in the membrane tank;
- d. Unusual plant upsets, presence of other potential transients or other undefined operating conditions that can affect membrane performance or life. This includes but is not limited to polymer "dumps", fats, oil and grease content in excess of 100 mg/L entering the biological system, the use, malfunction or by-pass of any equipment which allows the accumulation of non-biodegradable material in the membrane tanks, any

bypass of the pre-screen ahead of the aeration basins and/or basket strainers on the membrane tank inlet, rags or debris that fall into the biological or membrane tanks, toxic wastes entering the plant that upset the biological process;

- e. Any damage/defect caused by chemical or physical conditions such as (but not limited to) pH, temperature, chemicals, effluent COD is greater than 50 mg/L or climatic factors outside the recommended operating parameters in the appropriate section of the Operation & Maintenance Manual;
- f. Any damage directly or indirectly related to PLC and/or HMI/SCADA modifications without Seller's express written consent.
- g. Improper maintenance or operation of equipment (including failure to perform periodic chemical cleans) as defined in Seller supplied operating and maintenance manual.
- h. Neutralization and/or reduction of chemical cleaning solutions are performed in the membrane tank without written authorization from Seller;
- i. Supply of influent water exhibiting parameters inconsistent with the parameters determined or specified at time of bid and/or pilot testing.
- j. Sludge retention time (SRT) is:
 - less than 4 days over a 2-day history; or
 - less than as determined by the equation below over any 30-day period:
$$\text{SRT} = 12 / 1.029^{(T-20)}$$

Where: SRT = minimum SRT for biological process (average for any 30-day period)

 T = wastewater temperature (°C); or
 - greater than 80 days over a 30-day period.

4. Warranty Conditions: This warranty is conditioned upon Owner:

- a. Not being in default of any payment obligations to Seller; and
- b. Maintaining hand-written or electronic operational logs and providing such logs to Seller in the event of a warranty claim.
- c. Unless the capillary suction time (CST) is less than 20 seconds for mixed liquor before the membrane tank, the CST method should be as defined in Standard Methods for the Examination of Wastewater Treatment (latest edition), except that a 10-mm diameter stainless steel reservoir should be utilized rather than an 18-mm diameter.

5. Warranty Replacement Schedule

- a. **First 12 Months:** If a membrane module shall require replacement under the repair and replacement conditions described in section 2 above during the first twelve (12) months of the "Module Warranty Period", a replacement will be supplied by Seller at no charge.
- b. **Next 48 Months:** If a low pressure membrane module shall require replacement under the repair and replacement conditions described in section 2 above during the next forty-eight (48) months of the Module

Warranty Period, a replacement will be supplied by Seller and invoiced based upon a pro-rata value of a total of sixty (60) months. The pro-rata value shall be determined using a replacement price of US\$1,850.00 per module adjusted by the increase in the North American Consumer Price Index (CPI) All Urban Consumers (US City Average), and reducing this price by 1/60th for each month remaining in the 60-month period.

- c. Replacement modules supplied by the Seller to Owner under warranty shall assume the balance of the membrane module warranty that remained on the defective membrane module that was replaced under warranty.
 - d. Freight costs associated with the furnishing of replacement modules provided under the membrane module warranty is not included in the warranty replacement price. Accordingly, the shipping/delivery terms for replacement modules supplied under the membrane module warranty shall be "Ex Works Seller's Facility" and Seller shall arrange, and Owner shall pay for, transportation of replacement membrane modules to Owner's facility.
6. IN NO EVENT SHALL SELLER BE LIABLE FOR ANY INDIRECT, CONSEQUENTIAL, INCIDENTAL, SPECIAL, PUNITIVE OR OTHER DAMAGES AND SELLER'S TOTAL LIABILITY UNDER THIS MEMBRANE MODULE WARRANTY, WHEN ADDED TO ALL LIABILITY OF SELLER TO THE OWNER AND ANY END USER OF THE SYSTEM, IF DIFFERENT FROM THE OWNER, UNDER THE SYSTEM SALE CONTRACT, SHALL NOT EXCEED THE LIMITATION ON LIABILITY SET FORTH IN THE SYSTEM SALE CONTRACT. THE FOREGOING LIMITATIONS APPLY REGARDLESS OF WHETHER THE LIABILITIES OR DAMAGES ARISE OR ARE ALLEGED TO ARISE UNDER CONTRACT, TORT, STRICT LIABILITY OR ANY OTHER THEORY. The Warranty is expressly excluded from any performance bond(s) which may be furnished by the Seller.

*Anexo B-3: Cotización de sustancias químicas estimadas para el Sistema de Operación de
Membranas (MOS)*

Fuente: SERQUIMSA, 2016.

San José, 1° de Marzo, 2016

Estimado Ing.
Raily Solano Ramírez
UEN de Recolección y Tratamiento, Sistemas Periféricos
Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
Presente

Ref. SQS-0023-2016

Atendiendo su solicitud sobre la lista de precios de los productos químicos para el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados, estos se le detallan a continuación:

Descripción	Precio ^(*)
Hipoclorito de Sodio (al 12%)	\$ 0.39
Ácido Sulfúrico (al 40% o 90%)	\$ 0.89
Soda Caustica (al 50%)	\$ 0.51
Ácido Cítrico (al 99.99%)	\$ 1.40

^(*) No incluye Impuesto de Ventas

Estos precios son por Kilo de producto y están expresados en dólares americanos, no incluyen impuesto de ventas el cual es de un 13%.

Los precios **incluyen transporte y descarga** de los productos en la Planta de los Tajos, ubicada en la Uruca, diagonal al Sinart.

Por otra parte, destacamos que SERQUIMSA no solo vende un producto químico como tal, sino que también brinda un acompañamiento en asesorías, soporte técnico y en el diseño del mejor tratamiento físico - químico para los clientes.

La vigencia de estos precios es por 30 días.

Quedo a sus órdenes para atender cualquier duda o consulta adicional.

Atentamente,



Contacto: + (506) 4010-0265
Email: contacto@serquimsa.com
www.serquimsa.com

Lic. Randall Quesada Durán
Gerente de Mercadeo
Servicios y Tratamientos Químicos T.Q. S.A.



Contacto: + (506) 4010-0265
Email: contacto@serquimsa.com
www.serquimsa.com

Anexo B-4: Cotización de los rototamices para la tecnología MBR

Fuente: PAM, 2016.

Presupuesto N° CI160153R

Empresa:	INSTITUTO COSTARRICENSE DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO	Att:	ING. RAILLY SOLANO RAMÍREZ
Fecha:	18/03/16	Revisión:	1
Obra:	PTAR CIUDAD DE SAN JOSÉ	Paginas:	2

Condiciones de la oferta

Validez de la oferta: 30 DIAS

Fecha de entrega: A CONVENIR.

Portes – Flete Marítimo: CIF INCLUIDOS 2 ALTERNATIVAS A PUERTO LIMÓN Y/O PUERTO MOINT.

Forma de pago: 50% AL PEDIDO + 50% A LA FINALIZACION DEL EQUIPO.

No incluye:

Condiciones generales

El importe es unitario y neto, sin incluir impuestos.

Pasados el periodo de validez de la oferta, Procesos Auto-mecanizados se reserva el derecho de actualizar el importe.

Los portes correrán a cargo del cliente, excepto cuando se indique y se oferte.

La fecha de entrega se tendrá en cuenta a partir de la recepción de este documento y del croquis del equipo realizado por nuestra parte, aprobado y firmado por el cliente.

Procesos Auto-mecanizados no garantiza el cumplimiento de las fechas de entrega si existen modificaciones de las características del equipo.

El equipo siempre se facturará el día indicado en la fecha de entrega, aún retrasándose la recogida por parte del cliente.

Cuando la forma de pago es mediante pagaré, este debe ser recibido por nuestra parte a la salida del equipo de nuestros talleres, en caso contrario el equipo no se entregará hasta la recepción del mismo.

Todos los equipos disponen de una garantía de un año excepto manipulación, todo ello salvo condiciones particulares pactadas.

D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

- 1 -

D/Doña.....
Firma aceptación

REF-CI3722 TAMIZ ROTATORIO

- MODELO: PAM 630/3000
- CAUDAL MÁXIMO UNITARIO: 720 m³/h (agua limpia).
- CAUDAL MÁXIMO 1 **TANDEM (3 Equipos)**: 2160 m³/h (agua limpia).
- CAUDAL MÁXIMO TOTAL (6 tandem): 12960 m³/h (agua limpia).
- DIMENSIONES TAMBOR FILTRANTE: 630x3000mm.
- LUZ MALLA: Ranura continúa 1 mm.
- TIPO MALLA: Electrosoldada de ranura continúa con perfiles triangulares.
- MATERIAL CONJUNTO: Acero inox aisi-304.
- ACABADO SUPERFICIAL: Satinado mecánico.
- MATERIAL MALLA: Acero inox aisi-304.
- ACCIONAMIENTO: Motor-reductor eléctrico.
- POTENCIA INSTALADA: 0.37Kw.
- ALIMENTACIÓN: 380V (conexión de bornes en estrella).
- REGIMEN MOTOR: 1500 r.p.m.
- PROTECCION MOTOR: IP 55.
- RÉGIMEN DE GIRO: 5r.p.m.
- MATERIAL RASCADOR: Latón.
 - BRIDA SALIDA: POR DETERMINAR.
 - BRIDA ENTRADA: POR DETERMINAR.
 - BRIDA DE REBOSE: -.
- SISTEMAS DE LIMPIEZA:
 - Tubo de lavado interior.
 - Rasqueta rozante delantera.
 - Rasqueta rozante trasera.

IMPORTE TOTAL.....210.230 €.

D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

- 2 -

D/Doña.....
Firma aceptación

REF-CI3722 FLETE MARÍTIMO

OPCIÓN 1 - PUERTO LIMÓN 2 CONTENEDORES - VALOR CIF

- 1x20' box Ex Aspe - puerto de Puerto Limón - Seguro a todoriesgo incluido.

IMPORTE CONTENEDOR 1X20' 3.180 €.

- 1x40' box Ex Aspe - puerto de Puerto Limón - Seguro a todo riesgo incluido.

IMPORTE CONTENEDOR 1X40' 4.090 €.

IMPORTE TOTAL 2 CONTENEDORES PTO. LIMÓN.....7.270€.

NOTA: Los precios incluyen T3, Courier a destino y Eur 1**

Tiempo de tránsito 16 días aprox.

OPCIÓN 2 - PUERTO MOIN 2 CONTENEDORES

- 1x20' box Ex Aspe - puerto de Puerto Moin - Seguro a todoriesgo incluido.

IMPORTE CONTENEDOR 1X20' 2.907 €.

- 1x40' box Ex Aspe - puerto de Puerto Moin: - Seguro a todo riesgo incluido.

IMPORTE CONTENEDOR 1X20' 3.908 €.

IMPORTE TOTAL 2 CONTENEDORES PTO. MOIN.....6.815€.

NOTA: Los precios incluyen T3, Courier a destino y Eur 1**

Tiempo de tránsito 26 días aprox.

D. Flavio Huser
Dpto. Comercial internacional

D/Doña.....
Firma aceptación

Anexo C: Recomendaciones para la selección de equipo mecánico

A continuación, se resume una lista de recomendaciones para la selección de: (1) sopladores y (2) bombas para el caso de la PTAR Los Tajos. Las recomendaciones fueron aportadas por el Ing. Martin Fonseca.

1. Sopladores

1. Para los tanques de aireación de los biorreactores LAC, se recomiendan sopladores de desplazamiento positivo, tipo lobulares, pues tiene bajo costo inicial, bajos costos de mantenimiento, y no son sensibles a variaciones de presión. Sin embargo, pueden ser menos eficientes que otros equipos. Al ser de desplazamiento positivo permiten mantener la presión y aumentarla en caso de que los difusores se estén colmatando de lodos, permitiendo la continuidad de la aireación.

2. Los turbosopladores son equipos muy eficientes en consumo de potencia por volumen de aire (kW/m^3 aire). Sin embargo, tienen muchas desventajas las cuales se indican a continuación:

b.1) Tienen un costo inicial muy elevado.

b.2) Poca experiencia de su uso en América Latina.

b.3) Requieren rodamientos especiales para lograr altas revoluciones (cerca de 16.000 RPM). En el caso de utilizar rodamientos mecánicos, implica un sistema de lubricación especial para mantener el balance. Existen rodamientos magnéticos que no requieren lubricación; sin embargo, son muy sensibles a cambios de temperatura, por lo que debe controlarse la temperatura para evitar desplazamientos del eje. También existen equipos con rodamientos por cama de aire; sin embargo, se debe tener especial atención con el polvo porque pueden presentar fallas importantes. Todo lo anterior implica costos elevados en mantenimiento por reemplazo de piezas y mano de obra.

b.4) Los técnicos que dan mantenimiento a estos equipos son altamente capacitados, por lo que el costo del servicio técnico de estos equipos es muy elevado.

3. Para la aireación de los biorreactores IFAS se recomiendan los sopladores centrífugos multietapa de baja resolución, los cuales tienen las siguientes ventajas y desventajas:

c.1) El equipo es eficiente en la relación aire – costo energético.

c.2) Es un equipo costoso.

- c.3)* A pesar de que necesitan técnicos altamente especializados para brindar mantenimiento, registra bajos costos de mantenimiento.
 - c.4)* Es el equipo tiene más sistemas adicionales para operar, incluye: controladores de vibración, y control de velocidad variable.
 - c.5)* Es sensible a variaciones de presión.
 - c.6)* Es un equipo de tamaños menores que los de una sola etapa.
4. Los sopladores centrífugos también existen de una sola etapa, pero de alta velocidad, los cuales tienen las siguientes ventajas y desventajas:
- d.1)* El soplador más costoso de comprar y de darle el servicio de mantenimiento, es el centrífugo de una sola etapa de alta velocidad.
 - d.2)* Es el equipo más eficiente en la relación de aire – costo energético.
 - d.3)* Debido a la variación de la velocidad del motor y el posicionamiento de los álabes, se da un mejor control de producción de aire.
 - d.4)* El equipo tiene sistemas adicionales para operar, incluye: controladores de vibración, bombas de aceite y control de velocidad.
 - d.5)* Los repuestos son más caros y difíciles de conseguir, ya que requieren rodamientos muy específicos, y necesitan de técnicos altamente especializados.
 - d.6)* Son sensibles a variaciones de presión.

2. Bombas

1. Las bombas para extracción de lodos, tanto para recirculación como para purga de lodos, pueden ser sumergibles (inmersas en los lodos de los sedimentadores secundarios) o externas. Las bombas sumergibles están compuestas por un “monoblock”, lo que significa que la bomba y el motor son una sola pieza; mientras que las bombas externas están compuestas por: la bomba, un acople y el motor.
2. Para el proyecto de la PTAR Los Tajos se recomiendan las bombas sumergibles con camisa de enfriamiento.
3. Las bombas sumergibles deben instalarse con una carcasa en su superficie llamada “camisa de enfriamiento” cuya función es crear un flujo refrigerante alrededor del motor, de manera que se eviten los sobrecalentamientos que pudieran dañarlo.
4. Las bombas externas al componerse de varias partes requieren un mantenimiento periódico adicional para la alineación de los rotores, debido a las vibraciones constantes que se generan en

la operación común del equipo. Este aspecto debe considerarse dentro de las labores operativas y los costos de O&M.

5. Los equipos externos son aproximadamente 15% más costosos que los sumergibles.
6. En caso que haya algún problema únicamente con el motor de un equipo externo, la reparación o el cambio del motor deberá efectuarse con los mismos proveedores del equipo, pues sino no cubre la garantía a la bomba.

Anexo D: Recomendaciones para la construcción del túnel de interconexión entre los terrenos Los Tajos

A partir de consultas a expertos en el tema de tunelación, a continuación, se enumeran las recomendaciones principales para la construcción del túnel que interconectará los terrenos Tajo Sur y Tajo Norte:

a) Se recomienda que la construcción del túnel se realice previo el inicio de las obras de construcción de la etapa intermedia de la PTAR, esto facilitaría la logística del proceso constructivo. El tiempo de construcción aproximado podría ser de 20 días.

b) Administrativamente podría ser un proyecto pequeño individual, o bien, dentro de las obras de la etapa intermedia, donde la misma empresa que ejecute el proyecto construya o subcontrate la construcción del túnel.

c) Expertos en el tema recomiendan que el túnel sea de una geometría tipo: baúl-abovedado. Sus dimensiones variarían según las condiciones de diseño funcional, ya sea:

c.1) Un único túnel grande (aproximadamente de 7m de diámetro) donde se puedan colocar: todas las tuberías que deben cruzar los terrenos, una vía para el paso de un camión y espacio peatonal. Para el paso de la tubería por el túnel se pueden emplear soportes de anclaje.

c.2) Dos túneles pequeños, con una separación mínima entre ellos (3 veces el diámetro), donde uno sea para el paso de tubería, mientras que el otro sea para el paso peatonal y vehicular.

En ambos casos se debe dejar el espacio previsto para la colocación de las tuberías futuras (etapa II).

d) Para la realización del prediseño del túnel no se necesitan estudios exhaustivos adicionales, pues existe información base muy completa del tipo de roca de la zona. Únicamente se requieren estudios para confirmación de datos. La roca del talud es muy estable, por lo que el proceso de excavación es sencillo, se requiere mantener las previsiones de estabilidad durante todo el proceso.

e) El método constructivo recomendado es el convencional (de rascado) que se realiza con equipo básico de excavación, podría utilizarse una excavadora con martillo de impacto.

f) Durante la construcción se debe realizar un lanzamiento de concreto de mínimo 5 cm para su estabilización. El acabado final debe ser un recubrimiento estructural, preferiblemente de concreto lanzado en vez de colocación por medio de formaleta (por rapidez y costo). Durante todo el avance de la construcción, deberá realizarse un control geológico y topográfico.