



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUÍS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS

**“Síntesis Factibles de Redes Sustentables
de Tratamiento de Agua”**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS EN BIOPROCESOS**

PRESENTA:

M.C.S.D. Juan Ismael Padrón Páez

Directora de Tesis:

Dra. Alicia Román Martínez



SAN LUÍS POTOSÍ, S.L.P.

AGOSTO DE 2022

RESUMEN

En la actualidad, para una síntesis adecuada de sistemas de tratamiento de aguas residuales es fundamental considerar todas las dimensiones de la sustentabilidad. Así, para contrarrestar los efectos de la contaminación del agua por causas antropogénicas, se analiza la implementación de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales como una opción no convencional para mejorar la calidad del efluente tratado. Estos sistemas también son un hito para la reutilización del agua tratada en las actividades humanas, que conducen a un aprovechamiento sustentable del agua.

En este trabajo se busca desarrollar e implementar una metodología sistemática, donde las herramientas conceptuales y matemáticas se combinan en un enfoque híbrido. La metodología sistemática propuesta para la síntesis factible de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales se enfoca en sistemas sustentables, por lo que considera como criterio de decisión métricas económicas, ambientales y sociales.

La metodología sistemática se divide en las etapas de formulación y resolución de un problema de programación matemática de síntesis. En la primera etapa, se considera un caso de estudio para la formulación del problema de síntesis con funciones objetivo relacionadas a los indicadores de sustentabilidad, así como restricciones asociadas a las limitaciones del sistema y el modelado matemático basado en la superestructura de la red de plantas de tratamiento.

En la segunda etapa, se definen los algoritmos y software matemáticos para resolver el problema de síntesis formulado, y se selecciona la mejor opción en términos de síntesis y sustentabilidad a partir del conjunto de soluciones de compromiso factibles obtenidas.

La síntesis de redes de plantas de tratamiento sustentables se aborda mediante la formulación y solución de problemas de programación no lineal o programación mixta

entera no lineal, que involucran múltiples funciones objetivo que incluyen los tres aspectos de sustentabilidad.

El problema de síntesis multi-objetivo se resuelve mediante un método híbrido que combina los métodos lexicográficos y restricción ϵ . La solución consiste en un frente de Pareto, correspondiente a diferentes estrategias de síntesis en el espacio de variable asociado. Se utiliza una técnica modificada para el análisis de orden de preferencia por similitud con la solución ideal, como una herramienta de toma de decisiones con criterios múltiples para encontrar la mejor solución de compromiso.

La metodología sistemática se aplica a un caso real de aguas residuales municipales en el Valle del Mezquital, para obtener la red de plantas de tratamiento factible, donde se involucran funciones con múltiples objetivos que incluyen los tres aspectos de la sustentabilidad como: costo total, consumo energético, análisis del ciclo de vida y aguas residuales reutilizadas. El método ReCiPe se utiliza para evaluar el análisis de ciclo de vida de las redes de plantas de tratamiento.

Se plantean tres escenarios: (1) un problema de síntesis de redes de plantas de tratamiento en el que las plantas de tratamiento consideran el proceso de lodos activados, (2) se considera la síntesis desde cero de una planta de tratamiento individual, y (3) se utilizan los resultados de los escenarios anteriores para la resíntesis de la planta de tratamiento de Atotonilco, considerando una configuración de red de plantas de tratamiento.

Palabras clave: Redes de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales, Sustentabilidad, Síntesis Multi-objetivo, Análisis del Ciclo de Vida, Toma de Decisiones con Criterios Múltiples.

ÍNDICE

CONTENIDO	PÁGINA
CRÉDITOS ACADÉMICOS	I
INTEGRANTES DEL COMITÉ TÉCNICO DE TESIS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VII
ÍNDICE	IX
LISTA DE FIGURAS	XVIII
LISTA DE TABLAS	XXVI
LISTA DE VARIABLES, SÍMBOLOS O ABREVIACIONES	XXX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Justificación	18
1.2 Hipótesis	18
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo general	19
1.3.2 Objetivos específicos	19
1.4 Organización de la tesis	20

CONTENIDO	PÁGINA
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS	21
2.1 Aguas residuales	22
2.1.1 Contaminación del agua	23
2.1.2 Escasez del agua	25
2.1.3 Fuentes de aguas residuales y principales contaminantes	28
2.1.4 Impacto medioambiental y de salud	31
2.2 Tratamiento de aguas residuales	34
2.2.1 Consideraciones de sustentabilidad	36
2.2.2 Técnicas de tratamiento de aguas residuales	40
2.2.3 Tratamiento de aguas residuales en México	41
2.2.3.1 Indicadores de calidad	44
2.2.3.2 Normas vigentes	46
2.3 Redes de plantas de tratamiento de aguas residuales	49
2.3.1 Esquemas de las redes de plantas de tratamiento de aguas residuales	52
2.3.2 Métodos y herramientas para la síntesis de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales	56
2.3.2.1 Indicadores de sustentabilidad	57

CONTENIDO	PÁGINA
2.3.2.2 Enfoque de síntesis conceptual	64
2.3.2.2.1 Métodos gráficos	65
2.3.2.3 Enfoque de síntesis de síntesis	67
2.3.2.3.1 Síntesis Mono-objetivo	87
2.3.2.3.2 Síntesis Multi-objetivo	92
2.3.2.4 Enfoque híbrido	96
2.3.2.5 Toma de decisiones con criterios múltiples	98
3. METODOLOGÍA SISTEMÁTICA PARA LA SÍNTESIS FACTIBLE DE REDES SUSTENTABLES DE TRATAMIENTO DE AGUA	102
3.1 Paso 1: Recolección de información y datos del caso de estudio	104
3.1.1 Paso 1.a: Identificación y descripción del caso de estudio	106
3.1.2 Paso 1.b: Identificación de técnicas de tratamiento y limitaciones del proceso	108
3.1.3 Paso 1.c: Selección de indicadores de sustentabilidad	113
3.2 Paso 2: Generación de la superestructura	117
3.2.1 Paso 2.a: Superestructura de la RPTAR	117
3.2.2 Paso 2.b: Superestructura de la PTAR	119
3.3 Paso 3: Formulación del problema de síntesis	122

CONTENIDO	PÁGINA
3.3.1 Paso 3.a: Definición de las funciones de sustentabilidad multi-objetivo	123
3.3.2 Paso 3.b: Formulación de restricciones	123
3.4 Paso 4: Definición del modelo matemático de la RPTAR	124
3.4.1 Paso 4.a: Modelo matemático de referencia o relaciones constitutivas en la literatura	125
3.4.2 Paso 4.b: Desarrollo del modelo matemático	126
3.5 Paso 5: Estrategia de solución	131
3.5.1 Paso 5.a: Síntesis mono-objetivo	131
3.5.2 Paso 5.b: Síntesis multi-objetivo	132
3.5.3 Paso 5.c: Selección de software y solucionadores	133
3.6 Paso 6: Análisis de resultados y selección de la configuración factible	136
3.6.1 Paso 6.a: Análisis del frente de Pareto	136
3.6.2 Paso 6.b: Toma de decisiones con criterios múltiples	138
4. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	140
4.1 Redes de plantas de tratamiento de aguas residuales (RPTAR)	141
4.1.1 Paso 1: Recolección de información y datos del caso de estudio	142

CONTENIDO	PÁGINA
4.1.1.1 Paso 1.a: Identificación y descripción del caso de estudio	142
4.1.1.2 Paso 1.b: Identificación de técnicas de tratamiento y limitaciones del proceso	144
4.1.1.3 Paso 1.c: Selección de indicadores de sustentabilidad	148
4.1.2 Paso 2: Generación de la superestructura	151
4.1.2.1 Paso 2.a: Superestructura de la RPTAR	151
4.1.2.2 Paso 2.b: Superestructura de la PTAR	152
4.1.3 Paso 3: Formulación del problema de síntesis	154
4.1.3.1 Paso 3.a: Definición de las funciones de sustentabilidad multi-objetivo	154
4.1.3.2 Paso 3.b: Formulación de restricciones	157
4.1.4 Paso 4: Definición del modelo matemático de la RPTAR	158
4.1.4.1 Paso 4.a: Modelo matemático de referencia o relaciones constitutivas en la literatura	158
4.1.4.2 Paso 4.b: Desarrollo del modelo matemático	163
4.1.5 Paso 5: Estrategia de solución	165
4.1.5.1 Paso 5.a: Síntesis mono-objetivo	165
4.1.5.2 Paso 5.b: Síntesis multi-objetivo	166
4.1.5.3 Paso 5.c: Selección de software y solucionadores	167

CONTENIDO	PÁGINA
4.1.6 Paso 6: Análisis de resultados y selección de la configuración factible	168
4.1.6.1 Paso 6.a: Análisis del frente de Pareto	168
4.1.6.2 Paso 6.b: Toma de decisiones con criterios múltiples	185
4.2 Plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR)	196
4.2.1 Paso 1: Recolección de información y datos del caso de estudio	197
4.2.1.1 Paso 1.a: Identificación y descripción del caso de estudio	197
4.2.1.2 Paso 1.b: Identificación de técnicas de tratamiento y limitaciones del proceso	197
4.2.1.3 Paso 1.c: Selección de indicadores de sustentabilidad	198
4.2.2 Paso 2: Generación de la superestructura	203
4.2.2.1 Paso 2.a: Superestructura de la RPTAR	203
4.2.2.2 Paso 2.b: Superestructura de la PTAR	204
4.2.3 Paso 3: Formulación del problema de síntesis	204
4.2.3.1 Paso 3.a: Definición de las funciones de sustentabilidad multi-objetivo	204
4.2.3.2 Paso 3.b: Formulación de restricciones	207
4.2.4 Paso 4: Definición del modelo matemático de la RPTAR	210

CONTENIDO	PÁGINA
4.2.4.1 Paso 4.a: Modelo matemático de referencia o relaciones constitutivas en la literatura	210
4.2.4.2 Paso 4.b: Desarrollo del modelo matemático	210
4.2.5 Paso 5: Estrategia de solución	213
4.2.5.1 Paso 5.a: Síntesis mono-objetivo	213
4.2.5.2 Paso 5.b: Síntesis multi-objetivo	214
4.2.5.3 Paso 5.c: Selección de software y solucionadores	215
4.2.6 Paso 6: Análisis de resultados y selección de la configuración factible	216
4.2.6.1 Paso 6.a: Análisis del frente de Pareto	216
4.2.6.2 Paso 6.b: Toma de decisiones con criterios múltiples	226
4.3 Plantas de tratamiento de aguas residuales Atotonilco	230
4.3.1 Paso 1: Recolección de información y datos del caso de estudio	230
4.3.1.1 Paso 1.a: Identificación y descripción del caso de estudio	230
4.3.1.2 Paso 1.b: Identificación de técnicas de tratamiento y limitaciones del proceso	232
4.3.1.3 Paso 1.c: Selección de indicadores de sustentabilidad	233
4.3.2 Paso 2: Generación de la superestructura	234

CONTENIDO	PÁGINA
4.3.2.1 Paso 2.a: Superestructura de la RPTAR	234
4.3.2.2 Paso 2.b: Superestructura de la PTAR	235
4.3.3 Paso 3: Formulación del problema de síntesis	235
4.3.3.1 Paso 3.a: Definición de las funciones de sustentabilidad multi-objetivo	235
4.3.3.2 Paso 3.b: Formulación de restricciones	237
4.3.4 Paso 4: Definición del modelo matemático de la RPTAR	238
4.3.4.1 Paso 4.a: Modelo matemático de referencia o relaciones constitutivas en la literatura	238
4.3.4.2 Paso 4.b: Desarrollo del modelo matemático	239
4.3.5 Paso 5: Estrategia de solución	241
4.3.5.1 Paso 5.a: Síntesis mono-objetivo	241
4.3.5.2 Paso 5.b: Síntesis multi-objetivo	242
4.3.5.3 Paso 5.c: Selección de software y solucionadores	242
4.3.6 Paso 6: Análisis de resultados y selección de la configuración factible	243
4.3.6.1 Paso 6.a: Análisis del frente de Pareto	243
4.3.6.2 Paso 6.b: Toma de decisiones con criterios múltiples	250
5. CONCLUSIONES	253

CONTENIDO	PÁGINA
6. TRABAJO FUTURO	256
REFERENCIAS	259
ANEXOS	279
ANEXO A. Técnicas de tratamiento de aguas residuales	280
ANEXO B. Análisis de técnicas de tratamiento de aguas residuales	325
ANEXO C. Método ReCiPe	333
ANEXO D. Método M-TOPSIS	334
ANEXO E. Descripción de los estados de la ASM1	336
ANEXO F. Descripción de los estados de la ASM2d	341
ANEXO G. Condiciones iniciales y parámetros de síntesis para la simulación de las PTAR	352
ANEXO H. Análisis del comportamiento dinámico del ASM1 y ASM2d	354

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES

*“Si hiciésemos todas las cosas
de las que somos capaces,
nos asombraríamos”*

Thomas Edison

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se propone una metodología híbrida que combina el enfoque conceptual y de programación matemática, para la síntesis de redes de plantas de tratamiento de aguas residuales sustentables. La metodología se aplica a un caso de estudio de aguas residuales municipales de la Ciudad de México. El procedimiento de seis pasos permite la identificación, comparación y selección de las opciones de la red de tratamiento, a través de la identificación de las limitaciones, las restricciones, generación de la superestructura y la evaluación de las funciones objetivo.

Se analizan tres escenarios (síntesis RPTAR, síntesis PTAR y resíntesis PTAR) para el caso de estudio, en los que se evaluaron cuatro criterios (costo total (CT), consumo de energía (CE), impacto ambiental (IA) mediante el análisis del ciclo de vida (ACV) y aguas residuales reutilizadas (AR)) para abordar el desarrollo sustentable. A partir de la generación y evaluación de una superestructura se obtienen las opciones factibles del tratamiento.

La implementación del método de síntesis híbrida (lexicográfico + restricción ϵ) proporciona un conjunto de diferentes estrategias de síntesis factible en el espacio de variable asociado en forma de un frente de Pareto, cuando se tienen en cuenta las tres dimensiones de la sustentabilidad. Finalmente, para equilibrar el compromiso entre los aspectos económicos, ambientales y sociales, un problema de toma de decisiones con criterios múltiples (MCDM) se analiza mediante el procedimiento de clasificación M-TOPSIS, y se identifica la mejor solución de compromiso entre los criterios.

Entonces, se obtienen las RPTAR factibles sustentables para cada escenario. En otras palabras, se logran las mejores RPTAR posibles, que maximizan el porcentaje de reutilización de aguas residuales mientras minimizan el costo total y el criterio ambiental (el consumo de energía o ACV) en una solución de compromiso.

Los resultados de la síntesis multi-objetivo confirmaron la importancia de estudiar los tres aspectos de la sustentabilidad al mismo tiempo, porque el agua tratada se puede reutilizar para el riego agrícola. Así, los agricultores se beneficiarían de esta situación y se podría reducir la cantidad de agua dulce que se utiliza para estos fines. Adicionalmente, contribuiría para disminuir la presión que existe sobre el agua dulce y favorecería la utilización eficiente de este recurso, lo cual ayudaría a mitigar el problema de escasez de agua que se vive actualmente en el mundo. Por otro lado, los resultados obtenidos mediante el principio de Pareto sugieren que la energía consumida no es suficiente para evaluar el aspecto ambiental de la sustentabilidad, porque es una categoría que se puede evaluar como parte del ACV.

La RPTAR factible sustentable obtenida en la resíntesis de la PTAR de Atotonilco muestra la flexibilidad de la metodología propuesta, porque ha sido aplicada en diferentes escenarios para el mismo caso de estudio. Adicionalmente, los resultados obtenidos plantean la posibilidad de implementar RPTAR para cubrir la necesidad de tratamiento en México, todavía más, se podría considera utilizar la infraestructura existente para no incurrir en gastos adicionales que conllevan la planeación, síntesis y operación de una nueva PTAR.

Estos resultados son relevantes porque podrían ayudar a los tomadores de decisiones (por ejemplo, los empresarios) a definir nuevas leyes y comprender las implicaciones que tendrían las legislaciones futuras en el desempeño económico, ambiental y social de las empresas y ciudades.