



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA DE MEJORA DE UN SISTEMA DE  
COAGULACIÓN-FLOCULACIÓN COMO PRETRATAMIENTO DE UN  
SISTEMA DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA DE UNA REFINERÍA**

**TESIS  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA QUÍMICA**

**P R E S E N T A  
Arellano Lorenzo Barvara Erika**

**DIRECTOR DE TESIS  
DR. ALFOSO DURÁN MORENO**

**MÉXICO, D.F.**

**AÑO 2014**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor: María Rafaela Gutiérrez Lara

**VOCAL:** Profesor: Néstor Noé López Castillo

**SECRETARIO:** Profesor: Alfonso Durán Moreno

**1er. SUPLENTE:** Profesor: Federico Carlos Hernández Chavarría

**2° SUPLENTE:** Profesor: Jorge Alejandro Avella Martínez

## **SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

UNAM, Torre de Ingeniería

Nivel 3, Ala Sur

Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, México, D. F.

### **ASESOR DEL TEMA:**

-----  
**Dr. Alfonso Durán Moreno**

### **SUSTENTANTE:**

-----  
**Barvara Erika Arellano Lorenzo**



# ÍNDICE

<b>1.</b>	<b><i>Introducción</i></b> .....	<b>1</b>
1.1	Problemática .....	2
1.2	Justificación .....	3
1.3	Objetivo general .....	4
1.4	Objetivos particulares .....	4
<b>2.</b>	<b><i>Fundamentos teóricos</i></b> .....	<b>5</b>
2.1	Sistema de pretratamiento (Clarificación) .....	5
2.1.1	Suspensiones coloidales; su estabilidad en el agua .....	5
2.1.2	Coagulación.....	8
2.1.3	Floculación .....	11
2.1.4	Electrocoagulación .....	14
2.1.5	Sedimentación .....	16
2.1.6	Filtración .....	18
2.2	Fundamentos económicos.....	19
2.2.1	Indicadores de evaluación .....	19
2.2.2	Análisis de sensibilidad .....	24
2.3	Evaluación de tecnologías .....	25
2.3.1	Tecnología.....	25
2.3.2	Desarrollo de la metodología.....	25
<b>3.</b>	<b><i>Caso de Estudio</i></b> .....	<b>30</b>
3.1	Descripción del sistema de pretratamiento.....	33
3.2	Descripción de tecnologías a evaluar. ....	35
3.2.1	Decantación lastrada.....	36
3.2.2	Coagulación-Floculación optimizada .....	38
3.2.3	Clarificación con sedimentación a contracorriente .....	40
3.2.4	Electrocoagulación.....	41
<b>4.</b>	<b><i>Metodología</i></b> .....	<b>43</b>
4.1	Inspección física .....	45



<b>4.2</b>	<b>Elaboración de la metodología propuesta para la selección de tecnología de Pretratamiento de agua cruda en una refinería.....</b>	<b>46</b>
4.2.1	Identificación y definición de los aspectos a considerar dentro la evaluación. ....	47
4.2.2	Aspectos seleccionados para la evaluación. ....	48
4.2.3	Descripción de los aspectos, subaspectos y factores de evaluación. ....	49
4.2.4	Definición de criterios restrictivos. ....	56
4.2.5	Asignación de puntaje a cada aspecto a evaluar ....	57
4.2.6	Escala de calificación (Ci) ....	59
<b>5.</b>	<b><i>Resultados</i>.....</b>	<b>60</b>
<b>5.1</b>	<b>Inspección física del sistema de pretratamiento.....</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>Evaluación Matricial.....</b>	<b>62</b>
5.2.1	Aspectos técnicos de proceso.....	62
5.2.2	Aspectos Técnicos Complementarios.....	65
5.2.3	Aspectos económicos.....	67
5.2.4	Matriz con los Resultados de la evaluación.....	69
<b>6.</b>	<b><i>Discusión de Resultados</i>.....</b>	<b>71</b>
<b>6.1</b>	<b>Aspectos técnicos del proceso.....</b>	<b>71</b>
<b>6.2</b>	<b>Aspectos técnicos complementarios.....</b>	<b>72</b>
<b>6.3</b>	<b>Aspectos económicos.....</b>	<b>73</b>
<b>6.4</b>	<b>Evaluación Total.....</b>	<b>75</b>
<b>7.</b>	<b><i>Conclusiones</i>.....</b>	<b>77</b>
<b>8.</b>	<b><i>Bibliografía</i>.....</b>	<b>79</b>
<b>9.</b>	<b><i>ANEXOS</i>.....</b>	<b>81</b>
Anexo I.	Fotografías del Sistema de Pretratamiento de agua cruda de una Refinería.....	81
Anexo II.	Costos de operación y mantenimiento.....	83
Anexo III.	Análisis económico.....	89
Anexo IV.	Referencias de Plantas instaladas.....	99
Anexo V.	Diagramas de flujo.....	100

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b>	<b><i>Factores que influyen en el proceso de coagulación. ....</i></b>	<b>9</b>
<b>Tabla 2.</b>	<b><i>Tipo de coagulantes comunes. ....</i></b>	<b>10</b>
<b>Tabla 3.</b>	<b><i>Factores que influyen en el proceso de floculación.....</i></b>	<b>12</b>
<b>Tabla 4.</b>	<b><i>Factores que influyen en el proceso de electrocoagulación. ....</i></b>	<b>15</b>
<b>Tabla 5.</b>	<b><i>Descripción de Aspectos de una Evaluación. ....</i></b>	<b>27</b>
<b>Tabla 6.</b>	<b><i>Parámetros del agua cruda a tratar. ....</i></b>	<b>30</b>
<b>Tabla 7.</b>	<b><i>Parámetros máximos de agua clarificada requerida.....</i></b>	<b>31</b>
<b>Tabla 8.</b>	<b><i>Parámetros del agua clarificada obtenida actualmente.....</i></b>	<b>32</b>
<b>Tabla 9.</b>	<b><i>Clarificador.....</i></b>	<b>34</b>
<b>Tabla 10.</b>	<b><i>Descripción de tecnologías.....</i></b>	<b>35</b>
<b>Tabla 11.</b>	<b><i>Ventajas y desventajas de las tecnologías.....</i></b>	<b>42</b>
<b>Tabla 12.</b>	<b><i>Aspectos a considerar en la evaluación.....</i></b>	<b>48</b>
<b>Tabla 13.</b>	<b><i>Subaspectos y factores de los Aspectos Técnicos del proceso. ....</i></b>	<b>49</b>
<b>Tabla 14.</b>	<b><i>Definición de los subaspectos técnicos complementarios. ....</i></b>	<b>53</b>
<b>Tabla 15.</b>	<b><i>Subaspectos y factores de los aspectos económicos.....</i></b>	<b>54</b>
<b>Tabla 16.</b>	<b><i>Criterios restrictivos.....</i></b>	<b>56</b>
<b>Tabla 17.</b>	<b><i>Criterios restrictivos aplicados a las tecnologías. ....</i></b>	<b>56</b>
<b>Tabla 18.</b>	<b><i>Puntaje de los aspectos en la evaluación. ....</i></b>	<b>57</b>
<b>Tabla 19.</b>	<b><i>Escala de calificación de atributos. ....</i></b>	<b>59</b>
<b>Tabla 20.</b>	<b><i>Desviaciones encontradas en el sistema de pretratamiento para el caso de estudio. ....</i></b>	<b>60</b>
<b>Tabla 21.</b>	<b><i>Peso y calificación para los aspectos técnicos de proceso para cada tecnología.....</i></b>	<b>62</b>
<b>Tabla 22.</b>	<b><i>Concordancia del proceso con las bases de diseño. ....</i></b>	<b>63</b>
<b>Tabla 23.</b>	<b><i>Características específicas de las tecnologías.....</i></b>	<b>64</b>
<b>Tabla 24.</b>	<b><i>Resultados de la evaluación de los aspectos técnicos complementarios.....</i></b>	<b>65</b>
<b>Tabla 25.</b>	<b><i>Resultados de la evaluación de los Aspectos Económicos.....</i></b>	<b>67</b>
<b>Tabla 26.</b>	<b><i>Matriz de evaluación final de las Tecnologías para el Pretratamiento de agua cruda. ....</i></b>	<b>70</b>



<b>Tabla 27.</b>	<b><i>Lista de equipos mecánicos con el consumo de energía eléctrica del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.</i></b>	<b>83</b>
<b>Tabla 28.</b>	<b><i>Consumo de reactivos del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.</i></b>	<b>84</b>
<b>Tabla 29.</b>	<b><i>Costos del mantenimiento del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.</i></b>	<b>84</b>
<b>Tabla 30.</b>	<b><i>Costos de operación del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.</i></b>	<b>84</b>
<b>Tabla 31.</b>	<b><i>Resumen de costos del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.</i></b>	<b>85</b>
<b>Tabla 32.</b>	<b><i>Lista de equipos mecánicos con el consumo de energía eléctrica del sistema de Decantación Lastrada.</i></b>	<b>86</b>
<b>Tabla 33.</b>	<b><i>Consumo de reactivos del sistema de Decantación Lastrada.</i></b>	<b>87</b>
<b>Tabla 34.</b>	<b><i>Costos de mantenimiento del sistema de Decantación Lastrada.</i></b>	<b>87</b>
<b>Tabla 35.</b>	<b><i>Costos de operación del sistema de Decantación Lastrada.</i></b>	<b>87</b>
<b>Tabla 36.</b>	<b><i>Resumen de costos del sistema de Decantación Lastrada.</i></b>	<b>88</b>
<b>Tabla 37.</b>	<b><i>Datos base para el cálculo de los costos de cada sistema.</i></b>	<b>88</b>
<b>Tabla 38.</b>	<b><i>Análisis del horizonte de evaluación de la tecnología Decantación Lastrada</i></b>	<b>89</b>
<b>Tabla 39.</b>	<b><i>Valores del VPC durante el horizonte de evaluación para la Decantación Lastada.</i></b>	<b>92</b>
<b>Tabla 40.</b>	<b><i>Análisis del horizonte de evaluación de la tecnología Coagulación – Floculación Optimizada.</i></b>	<b>93</b>
<b>Tabla 41.</b>	<b><i>Valores del VPC durante el horizonte de evaluación para la Coagulación – Floculación Optimizada.</i></b>	<b>96</b>
<b>Tabla 42.</b>	<b><i>Variación del CAE en USD\$ para la Decantación Lastrada</i></b>	<b>97</b>
<b>Tabla 43.</b>	<b><i>Variación del CAE en % para la Decantación Lastrada.</i></b>	<b>97</b>
<b>Tabla 44.</b>	<b><i>Variación del CAE en USD\$ para la Coagulación – Floculación Optimizada</i></b>	<b>98</b>
<b>Tabla 45.</b>	<b><i>Variación del CAE en % para la Coagulación – Floculación Optimizada.</i></b>	<b>98</b>

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b>	<b><i>Modelo de la doble capa en partículas coloides (Malvern, 2013).</i></b>	<b>6</b>
<b>Figura 2.</b>	<b><i>Fenómeno de la coagulación</i></b>	<b>8</b>
<b>Figura 3.</b>	<b><i>Proceso involucrado en un reactor de electrocoagulación</i></b>	<b>14</b>
<b>Figura 4.</b>	<b><i>Indicadores de Evaluación (DPN, 2012).</i></b>	<b>19</b>
<b>Figura 5.</b>	<b><i>Visión amplia de un proyecto de transformación (Moreno, 1998).</i></b>	<b>26</b>



<b>Figura 6.</b>	<b>Diagrama para la selección y desarrollo de la metodología de evaluación (Moreno, 1998).....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 7.</b>	<b>Diagrama del sistema de pretratamiento actual.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 8.</b>	<b>Diagrama del proceso Decantación Lastrada.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 9.</b>	<b>Proceso de Coagulación-Floculación optimizada.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 10.</b>	<b>Equipo de clarificación con sedimentación a contracorriente. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 11.</b>	<b>Proceso de electrocoagulación .....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 12.</b>	<b>Diagrama de la metodología aplicada a este caso de estudio. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 13.</b>	<b>Comparación del Puntaje relacionado con los subaspectos del Aspecto técnico del proceso para cada tecnología evaluada. ....</b>	<b>72</b>
<b>Figura 14.</b>	<b>Comparación del Puntaje relacionado con los subaspectos del Aspecto técnico complementario para cada tecnología evaluada. ....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 15.</b>	<b>Comparación del Puntaje relacionado con los subaspectos del aspecto económico para cada tecnología evaluada.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 16.</b>	<b>Gráfica de la evaluación final de ambas tecnologías.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 17.</b>	<b>Clarificador WL-100 B, vista en superficie. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 18.</b>	<b>Clarificador WL-100 B, vista en superficie. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 19.</b>	<b>Clarificador WL-100 A, vista panorámica desde dentro del Equipo. Rastras y Cono. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 20.</b>	<b>Clarificador WL-100 A, vista en cuerpo central. Estructura de la cámara de reacción.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 21.</b>	<b>Entrada este del área de Pretratamiento.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 22.</b>	<b>Lado oeste del TV-100 (almacenamiento de agua clarificada).....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 23.</b>	<b>Lado este del tanque de almacenamiento de agua clarificada. ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 24.</b>	<b>Lado sur del Filtro (actualmente fuera de operación). ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 25.</b>	<b>Gráfica del análisis de sensibilidad del CAE para la Decantación Lastrada. ...</b>	<b>98</b>
<b>Figura 26.</b>	<b>Gráfica del análisis de sensibilidad del CAE para la Coagulación – Floculación Optimizada.....</b>	<b>98</b>



## 1. Introducción

En México, las Refinerías generan mediante las calderas la energía y vapor necesario para las plantas de procesos donde el petróleo crudo es transformado en diversos hidrocarburos o familias de hidrocarburos, como gasolinas, combustóleo, diésel, gas licuado y otros petrolíferos.

No disponer de agua con ciertos parámetros de calidad para la producción de vapor ocasiona daños económicos de tal magnitud, que pueden hacer fallar una instalación completa. El agua que contiene sales disueltas puede producir incrustaciones o corrosión en tuberías, válvulas, calderas, por mencionar algunos ejemplos.

Por lo antes expuesto, el agua debe ser tratada en un sistema de desmineralización utilizando resinas de intercambio iónico, en el cual se eliminan las sales contenidas en el agua. Este tratamiento debe contar con un sistema de pretratamiento para eliminar el color y la turbidez provocada por sólidos suspendidos y material coloidal presentes en el agua, por medio de una clarificación, en la que se dosifica un polímero para la floculación y un coagulante para la desestabilización de las partículas.

En este trabajo se analizará un caso de estudio real de un sistema de pretratamiento de agua, que opera con el principio de coagulación-floculación. El sistema cuenta con una capacidad máxima actual de 10,000 GPM que no opera eficientemente, ya que el agua que se genera no cumple con la calidad de entrada requerida al sistema de desmineralización, situación que ocasiona graves daños a dicho sistema, repercutiendo en el aumento de los costos, debido a un mayor mantenimiento requerido para las resinas utilizadas.

Para realizar una propuesta de mejora al sistema de pretratamiento en estudio, como primer punto se debe realizar un diagnóstico del funcionamiento del sistema



actual. En segundo lugar se deben identificar las tecnologías que se pueden implementar o sustituir por el sistema actual; por último realizar la selección de la más viable por medio de una metodología de evaluación matricial.

### **1.1 Problemática**

El sistema de pretratamiento de agua cruda tiene la función de abastecer agua clarificada a los trenes y/o sistemas de torres de enfriamiento, servicios y sistemas de desmineralización en el sistema de refinación nacional.

Generalmente, cuando un sistema de pretratamiento presenta problemas en la operación, ya sea por un error en el cálculo de adición de reactivos o por un sistema de agitación mal diseñado u operando deficientemente, provoca que los sistemas que utilizan el agua del sistema de pretratamiento con baja calidad en los estándares esperados presenten también problemas en su operación.

Usar agua clarificada con sólidos suspendidos para producir agua desmineralizada ocasiona problemas en la operación de la planta de desmineralización, ya que los sólidos suspendidos presentes en el agua se adhieren a las resinas, provocando una disminución en el contacto del agua que se desea tratar para eliminar los minerales con las resinas del sistema.

Esto provoca que sea necesario realizar limpieza química disminuyendo los ciclos de regeneración, aumentando el consumo de regenerante hasta en un 54% del consumo normal y aumentando el flujo de efluentes hacia la fosa de neutralización y por consiguiente hacia la descarga en el río.

## 1.2 Justificación

El presente trabajo se plantea por la necesidad de mejorar la situación actual del sistema de pretratamiento de agua cruda para una refinería, buscando optimizar y mejorar el proceso actual, con tecnologías susceptibles de aplicarse, con costos que reflejen su rentabilidad en la refinería en donde se ubica.

Con la finalidad de plantear alternativas para mejorar el pretratamiento del agua cruda es importante determinar los aspectos principales que impactan en el incumplimiento de la calidad del agua clarificada que se entrega al sistema de desmineralización.

Es de suma importancia mantener la confiabilidad en el suministro de agua clarificada en cantidad y calidad para la planta desmineralizadora, razón por la cual surge la necesidad de realizar un diagnóstico y una propuesta de mejora del sistema de pretratamiento de agua buscando la sustitución del sistema actual, por un sistema con tecnología de vanguardia que cumpla con los requerimientos de calidad, confiabilidad de operación, asistencia tecnológica, así como de la disponibilidad de partes de repuesto para su mantenimiento.

Uno de los principales beneficios de mejorar el pretratamiento de agua cruda, es garantizar la calidad de agua clarificada requerida por los diferentes procesos, así como un uso más razonable de los agentes químicos necesarios para darle la calidad deseada, disminuyendo su uso que puede afectar en grandes cantidades al ambiente y los costos que estos representan.

Si el proyecto no se lleva a cabo se tendrían considerables pérdidas económicas en cuanto a químicos, mantenimiento en equipos, tanto en el sistema de pretratamiento de agua cruda, como en el sistema de desmineralización debido a una mala operación y mantenimiento. Además de presentar problemas de largo plazo en el proceso de generación de vapor, puesto que se presenta una reacción en cadena, si el sistema de pretratamiento no funciona, ocasiona problemas en la operación del sistema de desmineralización, provocando que la operación no

cumpla con la eliminación de sales, lo que provocaría incrustaciones o corrosión en tuberías, calderas, etc.

### **1.3 Objetivo general**

Realizar un diagnóstico de la situación actual del sistema de pretratamiento de agua cruda para una Refinería que funciona con el principio de coagulación-floculación y elaborar una propuesta conceptual de modernización mediante una evaluación matricial de tecnologías, determinando los aspectos más importantes a calificar para su implementación en un caso de estudio particular. Para asegurar la confiabilidad en el suministro de agua para el sistema de desmineralización.

### **1.4 Objetivos particulares**

- ❖ Realizar un diagnóstico de la situación actual de un sistema de pretratamiento de agua cruda particular en una Refinería.
- ❖ Estudiar las tecnologías existentes y viables con el principio de coagulación floculación para una sustitución del sistema de pretratamiento de agua cruda.
- ❖ Aplicación de una metodología para seleccionar una tecnología específica para la modernización del sistema de pretratamiento de agua cruda, de acuerdo a criterios técnicos y económicos, que aseguren la confiabilidad en el suministro de agua para el sistema de desmineralización.
- ❖ Determinar la mejor opción con ayuda de la evaluación matricial de tecnologías.

## **2. Fundamentos teóricos**

### **2.1 Sistema de pretratamiento (Clarificación)**

La operación llamada pretratamiento de agua, es en realidad la primera etapa del tratamiento de agua para calderas de mediana a alta presión, llamada en algunos casos tratamiento primario, y consiste en la aplicación de los procesos de clarificación, filtración y deshidratación de lodos.

En este sistema se lleva a cabo la desestabilización de coloides y sólidos suspendidos finos, logrando la precipitación de las partículas desestabilizadas (Reynolds, 1982). Una manera de medir la concentración de lo antes mencionado es la turbidez, que es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloides o sólidos suspendidos muy finos (Rigola, 1990).

La presencia en el agua de diversas sustancias sólidas constituye, una parte importante y la más aparente de la contaminación en agua de superficie.

Debe eliminarse esta fracción sólida para evitar gran número de inconvenientes, de los cuales, los más importantes son: obstrucción de conducciones o de refrigerantes, abrasión de bombas o de órganos de medida, desgaste de materiales diversos, etc., que inciden notablemente en los costos de operación o de mantenimiento de las unidades de proceso. En el caso de agua de abastecimiento o de vertidos, deben cumplirse, además, las exigencias de la norma NOM-001-SEMARNAT-1996.

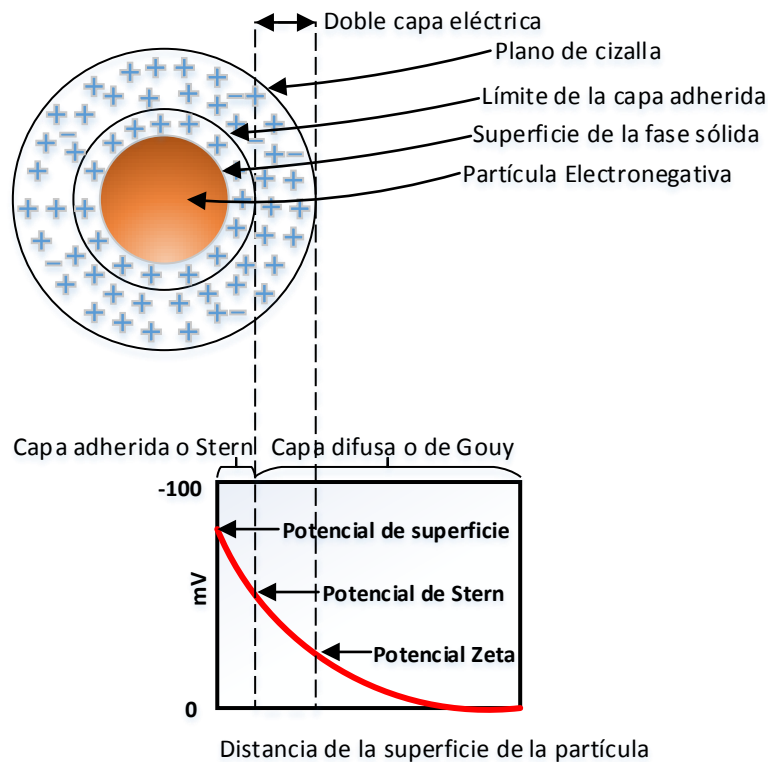
#### **2.1.1 Suspensiones coloidales; su estabilidad en el agua**

El agua posee tres tipos principales de impurezas: físicas, químicas y biológicas. Desde el punto de vista físico se puede decir que los sólidos totales se pueden clasificar como partículas no filtrables o en suspensión, filtrables o disueltas y una tercera posibilidad es el caso intermedio que corresponde a los coloides. En general, los coloides no tienen un límite fijo de tamaño y se suelen estudiar bajo un

enfoque fisicoquímico desde el punto de vista de sus propiedades. Un material coloidal puede tardar 755 días en sedimentar; por tanto es importante cambiar esta condición.

Los coloides forman suspensiones estables, por lo que es imposible su sedimentación natural; también son sustancias responsables de la turbiedad y del color del agua.

Los sistemas coloidales presentan una superficie de contacto inmensa entre la fase sólida y la fase líquida; éstas poseen normalmente una carga eléctrica negativa situada sobre su superficie. Estas cargas llamadas cargas primarias, atraen los iones positivos del agua, los cuales se adhieren fuertemente a las partículas y atraen a su alrededor iones negativos acompañados de una débil cantidad de iones positivos. En la Figura 1 se presenta el modelo de la doble capa en partículas coloidales.



**Figura 1.** Modelo de la doble capa en partículas coloides (Malvern, 2013)

Los iones que se adhieren fuertemente a la partícula y se desplazan con ella, forman la capa adherida o comprimida, mientras que los iones que se adhieren débilmente constituyen la capa difusa, por lo tanto existe un gradiente o potencial electrostático entre la superficie de la partícula y la solución, llamado Potencial Zeta.

Los coloides son normalmente estables en solución. En general, predominan los factores estabilizantes sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se encuentran a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan. Entre ellas la gravedad, el movimiento Browniano y las fuerzas de Van der Waals. Obviamente algunos fenómenos afectan el sistema mucho más que otros. Por ejemplo, la influencia de la gravedad es despreciable.

La estabilidad de una dispersión coloidal está relacionada con la teoría de la interacción energética entre las partículas como una función de su distancia. Además de las fuerzas electrostáticas de repulsión entre los coloides, pueden actuar las fuerzas de Van der Waals, que son fuerzas de atracción originadas por acción de dipolos permanentes o inducidos en las partículas. Las fuerzas de Van der Waals son independientes de la carga neta de los coloides y no varían con el pH o con otras características de la fase acuosa, pero sólo actúan a distancia muy pequeña. Al acercarse dos partículas la fuerza de repulsión aumenta para mantenerlas separadas. Si se acerca lo suficiente y sobrepasan la barrera de energía, entonces la fuerza de atracción de Van der Waals predominará y las partículas podrán unirse. Cuando se obtiene esta condición se dice que el coloide se ha desestabilizado. (Degrémont, 1979).

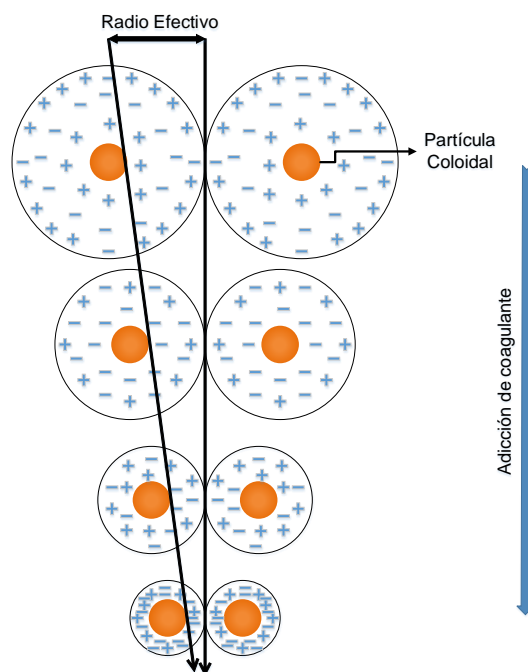
### 2.1.2 Coagulación

Es un proceso de desestabilización química de las partículas coloidales que se producen al neutralizar las fuerzas que los mantienen separados, por medio de la adición de coagulantes químicos y la aplicación de la energía de mezclado.

La coagulación es el tratamiento más eficaz pero también es el que representa un gasto elevado cuando no está bien realizado. Es el método universal por el cual se eliminan una gran cantidad de sustancias de diversas naturalezas y de diversos pesos de materia que son eliminados al menor costo, en comparación con otros métodos.

El término coágulo se refiere a las relaciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) en agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundos.

La adición de un coagulante neutraliza las cargas, produciendo un colapso de la “nube de iones” que rodean los coloides de modo que puedan aglomerarse. En la Figura 2 se presenta un esquema del fenómeno de la coagulación.



**Figura 2.** Fenómeno de la coagulación



Una alternativa en el tratamiento de aguas residuales, tanto domésticas como industriales, es el proceso fisicoquímico. Consiste en remover con ayuda de coagulantes, principalmente sales metálicas y/o polielectrolitos, los sólidos suspendidos o disueltos. Los productos de este tipo de tratamiento son la suma de la materia orgánica, suspendida y disuelta, removida del agua y los coagulantes añadidos.

Durante el tratamiento del agua, se le agregan coagulantes químicos que son usados para desestabilizar las partículas, remover materia orgánica particulada, inducir la floculación y obtener una buena sedimentación (Aguilar, 2002). Para llevar a cabo el proceso de coagulación deben considerarse los efectos que se presentan en la Tabla 1, para tener una correcta aplicación del proceso (Rigola, 1990).

**Tabla 1.** Factores que influyen en el proceso de coagulación.

CAUSA	EFEECTO
<b>Tipo y cantidad de coagulante</b>	Aunque hay una cierta relación entre la turbidez del agua bruta y la dosis de coagulante, la cantidad exacta se debe determinar mediante ensayos (Jar-test) para evitar sobredosificaciones que rompan la adsorción superficial.
<b>pH del agua</b>	Para cada coagulante, existe una zona de pH donde se produce una buena floculación en plazo corto y con una dosis dada de coagulante. Siempre que sea posible, en esa zona para optimizar productos y rendimientos.
<b>Tiempo de coagulación</b>	Es el tiempo transcurrido entre la adición de coagulante y el final de la agitación a una velocidad que impida la decantación de las materias floculadas.
<b>Temperatura del agua</b>	La temperatura influye en el tiempo requerido para una buena formación de coágulos (más fría, más tiempo). Lo recomendable es una temperatura ambiente.
<b>Agitación y presencia de sólidos en suspensión</b>	Si en la solución se encuentra mayor número de partículas en la solución y se tiene una agitación constante, mayor será el número de colisiones que se lleven a cabo entre partículas para formar flóculos de mayor tamaño y la sedimentación se lleva rápidamente.

Históricamente, los coagulantes metálicos, sales de hierro y aluminio, han sido los más utilizados en la clarificación de aguas, eliminación de DBO y de fosfatos de aguas residuales. Tienen la ventaja de actuar como coagulante-floculante al mismo tiempo. Forman especies hidratadas complejas cargadas positivamente:



Sin embargo, tienen el inconveniente de ser muy sensible a un cambio de pH. Si éste no está dentro del intervalo adecuado la clarificación es pobre y pueden solubilizar al Fe ó Al y generar problemas. En la Tabla 2 se presentan los coagulantes que se utilizan frecuentemente.

**Tabla 2.** Tipo de coagulantes comunes.

Coagulante	Características
<b>Sulfato de aluminio</b>	Conocido como alumbre, es un coagulante efectivo en intervalos de pH de 6 a 8. Produce un flóculo pequeño y esponjoso, por lo que no se usa en precipitación previa de aguas residuales por el alta carga contaminante del agua. Sin embargo, su uso está generalizado en el tratamiento de agua potable y en la reducción de coloides orgánicos y fósforo.
<b>Sulfato férrico</b>	Funciona de forma estable en un intervalo de pH de 4 a 11, uno de los más amplios conocidos. Producen flóculos grandes y densos que decantan rápidamente, por lo que está indicado tanto en la precipitación previa como en la co precipitación de aguas residuales urbanas o industriales. Se emplea también en tratamiento de aguas potables aunque en algún caso puede producir problemas de cloración.
<b>Cloruro férrico</b>	Es similar al anterior aunque de aplicación muy limitada por tener un intervalo de pH más corto. Es muy buen coagulante aunque puede presentar problemas de cloración en aguas.
<b>Aluminato sódico</b>	Se emplea poco. Su uso más habitual es para la eliminación de color a pH bajo. Además se puede usar en el ablandamiento de agua con cal.

### 2.1.3 Floculación

La floculación consiste en la aglomeración, mediante la agitación moderada del agua, de las partículas que se desestabilizaron durante la coagulación, formando otras de mayor tamaño y peso específico.

Los objetivos básicos de la floculación son reunir microflóculos para formar partículas con peso específico superior al del agua y compactar el flóculo disminuyendo su grado de hidratación para producir baja concentración volumétrica, lo cual produce una alta eficiencia en los procesos posteriores como sedimentación y filtración.

Tan pronto como se agregan coagulantes a una suspensión coloidal, se iniciará una serie de reacciones hidrolíticas que adhieren iones a la superficie de las partículas presentes en la suspensión, las cuales tienen así oportunidad de unirse por sucesivas colisiones hasta formar flóculos que crecen con el tiempo.

La rapidez con que esto ocurre depende del tamaño de las partículas con relación al estado de agitación del líquido, de la concentración de las mismas y de su “grado de desestabilización”, que es el que permite que las colisiones sean efectivas para producir adherencia.

Los contactos pueden realizarse por dos modos distintos:

**Floculación Pericinética:** Contactos por bombardeo de las partículas producidos por el movimiento de las moléculas del líquido (movimiento browniano) que sólo influye en partículas de tamaños menores a un micrón. Solo actúan al comienzo del proceso, en los primeros 6 a 10 segundos y es independiente del tamaño de la partícula.

**Floculación Ortocinética:** Contactos por turbulencia del líquido, esta turbulencia causa el movimiento de las partículas a diferentes velocidades y direcciones lo cual aumenta notablemente la probabilidad de colisión. Efectivo sólo con partículas mayores a un micrón. Actúa el resto del proceso, de 20 a 30 min (Aguilar, 2002).

Para llevar a cabo el proceso de floculación deben tomarse en cuenta los factores que se presentan en la Tabla 3, para tener una correcta aplicación del proceso (Rigola, 1990).

**Tabla 3.** Factores que influyen en el proceso de floculación

CAUSA	EFEECTO
<b>Concentración y naturaleza de las partículas</b>	La velocidad de formación del flóculo es proporcional a la concentración de partículas en el agua y del tamaño inicial de estas.
<b>Tiempo de detención</b>	La velocidad de aglomeración de las partículas es proporcional al tiempo de detención. Debe estar lo más cerca posible al óptimo determinado por medio de ensayos de jarras, esto se puede lograr dividiendo la unidad de floculación en cámaras. Se puede decir que una eficiencia dada, se obtiene en tiempos cada vez menores a medida que se aumenta el número de cámaras de floculación en serie. Por razones de orden práctico, el número de cámaras no puede ser muy grande, estableciéndose un mínimo de tres unidades.
<b>Gradiente de velocidad</b>	Este es un factor proporcional a la velocidad de aglomeración de las partículas. Existe un límite máximo de gradiente que no puede ser sobrepasado, para evitar el rompimiento del flóculo. El gradiente a través de las cámaras debe ser decreciente y no se deben tener cámaras intermedias con gradientes elevados.

Los floculantes, llamados también ayudantes de coagulación o ayudantes de floculación e incluso ayudantes de filtración, son productos destinados a favorecer cada una de estas operaciones. La acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo (flóculo más pesado, más voluminoso y más coherente).

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico).

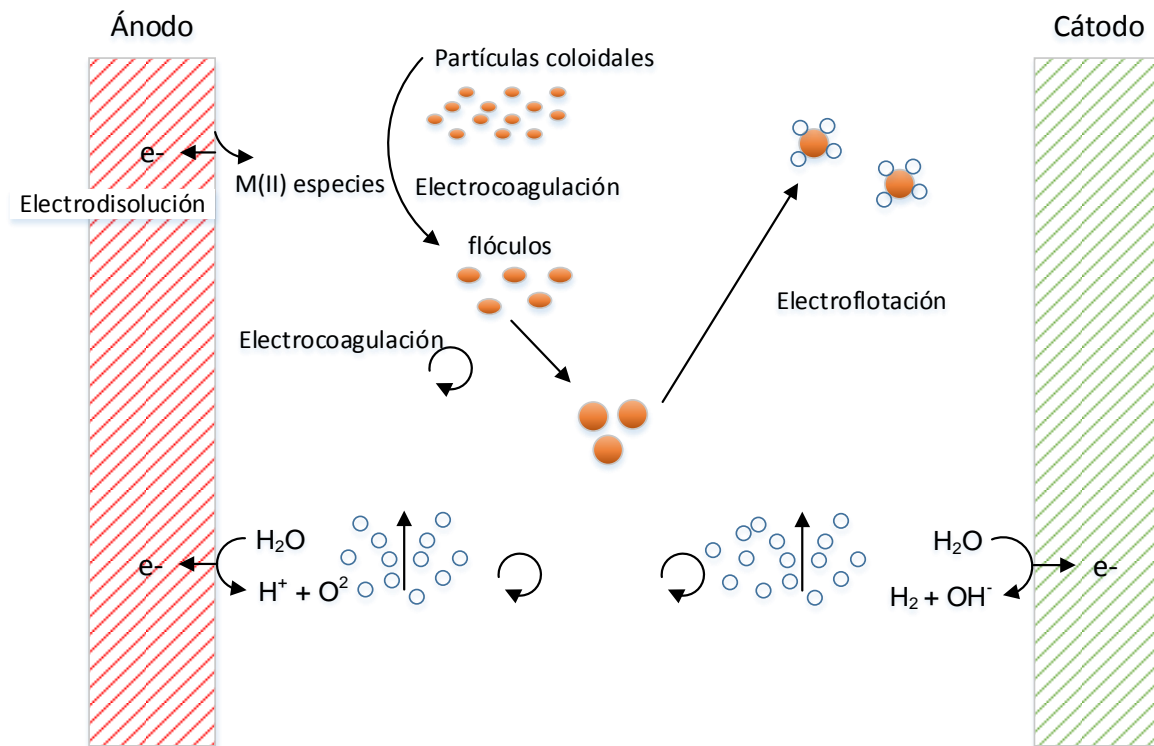
La sílice activada fue el primer floculante que se empleó, y sigue siendo, en la actualidad, el que mejores resultados puede dar, principalmente si se utiliza juntamente con sulfato de alúmina. Se introduce, generalmente, después del coagulante, y se prepara neutralizando parcialmente la alcalinidad de una solución de silicato sódico.

La sílice activada está constituida por una solución de ácido polisilícico  $(H_2 Si O_3)_4$  procedente de la polimerización controlada del ácido silícico. Es poco estable, por lo que debe prepararse «in situ». Sin embargo, durante mucho tiempo se le ha considerado como el mejor floculante capaz de asociarse a las sales de aluminio, hasta el reciente desarrollo de los polielectrólitos

Los polielectrólitos son compuestos complejos de alto peso molecular que se utilizan no propiamente como coagulante sino como ayudante de coagulación. La dosificación de estas sustancias se lleva a cabo en concentraciones muy bajas, lo cual es una gran ventaja y compensa el costo del polímero. Están siendo ampliamente empleados en el tratamiento de aguas potables ya que se produce una menor cantidad de lodos, adicionalmente el lodo producido es más fácilmente tratable.

### 2.1.4 Electrocoagulación

El proceso electroquímico de desestabilización de una disolución coloidal es muy similar a un tratamiento químico típico de coagulación. El proceso tiene por objetivo la desestabilización de los coloides, y se diferencia en el modo de adición del reactivo: en coagulación convencional el reactivo se añade como sal y en electrocoagulación se genera a partir de un metal. Ver Figura 3 (Mansouri, 2011).



**Figura 3.** Proceso involucrado en un reactor de electrocoagulación

La electrocoagulación es un proceso electroquímico en el cual el coagulante químico se produce in situ por disolución de ánodos de sacrificio (hierro o aluminio) y formación de iones hidroxilo en el cátodo. Los iones de metal liberados pueden formar varias especies hidroxilo – metales monoméricos y poliméricos en el agua, que desestabilizan contaminantes suspendidos, emulsificados o disueltos y forman partículas insolubles que adsorben y atrapan los contaminantes.

En la superficie del cátodo se forman burbujas de gas que ayudan a desestabilizar las partículas y aglomerarlas para producir partículas más grandes y facilitar la

separación de los contaminantes floculados transportando las partículas hacia la superficie de la solución donde se pueden remover más fácilmente por flotación.

Para llevar a cabo el proceso de electrocoagulación deben tomarse en cuenta los factores presentados en la Tabla 4, para tener una correcta aplicación del proceso (Charfuelan, 2012).

**Tabla 4.** Factores que influyen en el proceso de electrocoagulación.

CAUSA	EFECTO
<b>pH</b>	Tiene un efecto considerable en la eficiencia del proceso, generalmente el pH del medio cambia durante el proceso, este cambio depende principalmente del material del electrodo y el pH inicial. El rendimiento del proceso depende de la naturaleza del contaminante y la mejor remoción de acuerdo con algunas investigaciones se presentaría valores de pH cercanos a 7.
<b>Densidad de corriente</b>	Determina la dosis de coagulante, la producción de burbujas y el tamaño de los floculos, lo cual puede influenciar la eficiencia de la electrocoagulación. De acuerdo con la ley de Faraday cuando la densidad de corriente aumenta, la cantidad de iones producidos sobre los electrodos aumenta también. Por lo tanto, una densidad de corriente más alta generará una mayor cantidad de floculos que capturan las moléculas de contaminantes y mejoran la eficiencia en la remoción de color.
<b>Arreglo de los electrodos</b>	En el arreglo monopolar cada par de electrodos de sacrificio están conectados entre ellos, sin tener conexión con los electrodos externos. Es importante la configuración de los electrodos en la celda porque ésta afecta la eficiencia eléctrica del sistema, existen dos posibles arreglos con respecto a estos: monopolar y bipolar.
<b>Material del electrodo</b>	Dependiendo del material del electrodo se obtienen las reacciones de oxidación y reducción respectivas.
<b>Voltaje</b>	El potencial aplicado determina las especies predominantes en la reacción que se lleva a cabo en el ánodo.

### 2.1.5 Sedimentación

El objetivo de la sedimentación es el depósito de las partículas que se encuentran en suspensión en el agua y los flóculos que se forman por el fenómeno de floculación – coagulación.

El proceso puede ser intermitente, donde se realiza el llenado de un depósito de agua y permanece en reposo durante varias horas para después vaciar la parte superior del agua hasta el nivel que está por encima de los lodos depositados. Sin embargo, el proceso es muy lento para implementarlo en la industria, donde se requiere un mayor flujo de agua. En estos casos es preferible utilizar decantadores continuos rectangulares o circulares. Para que se depositen los lodos es preciso que la velocidad ascensional del agua sea inferior a la velocidad de caída de las partículas, lo que depende de la densidad y tamaño de las mismas.

Los decantadores estáticos deben funcionar preferible de forma rectangular, puesto que las variaciones de flujo en un tanque circular provocan la formación de remolinos que hacen que los lodos suban a la superficie.

Igualmente, cualquier variación de temperatura, por pequeña que sea, entre el agua bruta y el agua del decantador, da lugar a movimientos de convección que producen el mismo efecto.

Se ha observado que, en un decantador estático, la velocidad ascensional límite es independiente de la profundidad del depósito de decantación. Para mejorar los resultados con los mismos depósitos existentes, se han equipado éstos con módulos que constituyen, cada uno, un decantador de menor altura, con lo que, a igualdad de altura, puede aumentarse la carga superficial del depósito existente.

Los progresos de la técnica han mejorado la floculación aumentando la concentración del flóculo, o recirculando los fangos, con lo cual se acelera la decantación.



El progreso técnico ha permitido pasar de los clarificadores de raquetas a los clarificadores de succión y a los aparatos combinados.

En el caso de aguas de consumo o de aguas destinadas a la industria, se combinan la floculación y la decantación en un aparato único. Por ejemplo, alguna serie de patentes como el Circulator (que utiliza la recirculación de lodos) o el Pulsador (que produce un colchón de lodos cuyo seno la concentración de materia en suspensión es elevada) por medio de los cuales se consiguen reacciones completas con precipitados densos. De esta forma, puede aumentarse considerablemente la velocidad de circulación del agua y adoptarse una superficie de decantación igual al flujo horario dividido por 1.5 a 6, según el tipo de decantador. Con estos decantadores pueden obtenerse un agua decantada siempre de buena calidad y constante.

Una cámara especial o concentrador garantiza el espesamiento del exceso de lodos y permite su evaluación de manera automática. Cuando el volumen de lodos es elevado, se utiliza el decantador-floculador de raquetas.

Con los sistemas de decantación por contacto de lodos mejoran los fenómenos de floculación y se obtiene un rendimiento óptimo de la cantidad de reactivos introducida, debido a la concentración que se produce en el colchón de lodos. Se consigue así una mejor adsorción de las materias disueltas sobre el flóculo formado (Degrémont, 1979).

### 2.1.6 Filtración

La filtración es un procedimiento en el que se utiliza el paso de una mezcla sólido-líquido a través de un medio poroso (filtro) que retiene los sólidos y deja pasar los líquidos (filtrado).

Si la materia en suspensión que deben separarse tiene una dimensión superior a la de los poros, quedarán retenidas en la superficie del filtro. La filtración se denomina, en ese caso, superficial o en torta, o también sobre soporte. En caso contrario, las materias quedarán retenidas en el interior de la masa porosa y la filtración se denomina en volumen o en profundidad, o también sobre lecho filtrante.

La misión de los filtros es retener, en la superficie o en el seno de la masa filtrante, las partículas que contiene un líquido. Se denomina filtración en superficie a la primera y filtración en profundidad a la segunda. La filtración en superficie se efectúa sobre un elemento soporte, y la filtración en profundidad a través de un lecho filtrante.

Los flóculos que resultan de la coagulación total del agua, se eliminan en su mayor parte en el proceso de decantación; el agua que llega a los filtros sólo contiene trazas de flóculos cuya cohesión depende de los reactivos utilizados. Con una buena decantación, los filtros se encuentran en la situación ideal que consiste en recibir un agua de calidad prácticamente constante y con una concentración baja de sólidos suspendidos. La filtración es, entonces, un tratamiento de acabado y de seguridad necesario cuando el agua se destine al consumo público, a tratamientos industriales de productos elaborados o a fabricaciones industriales de calidad.

Las velocidades de filtración dependen de la calidad del filtrado que se desee; puede variar entre 5 y 29 m/h según la calidad del agua decantada y de los filtros utilizados (Degrémont, 1979).

## 2.2 Fundamentos económicos

Las situaciones que se pueden presentar al interior de una empresa para tomar decisiones económicas son muy diversas. El análisis económico del proyecto debe ser esencialmente cuantitativo, partiendo de los elementos que aporta el análisis técnico. Una pregunta básica planteada es si la propuesta de una inversión de capital y los gastos asociados con ella pueden recuperarse por medio de ingresos (o ahorros) a lo largo del tiempo, además del rendimiento sobre el capital, que tendrán que ser suficientemente atractivos, en comparación con los riesgos que se corren y los usos potenciales alternativos. (Baca, 2007).

### 2.2.1 Indicadores de evaluación

Los patrones de la inversión del capital, de los flujos de efectivo de los ingresos (o ahorros) y de los gastos suelen ser muy diferentes para distintos proyectos, no existe un Indicador de evaluación único para efectuar un análisis de ingeniería económica que sea ideal para todos los casos. En consecuencia, es común que se utilicen varios indicadores de evaluación, los cuales se presentan en la Figura 4.

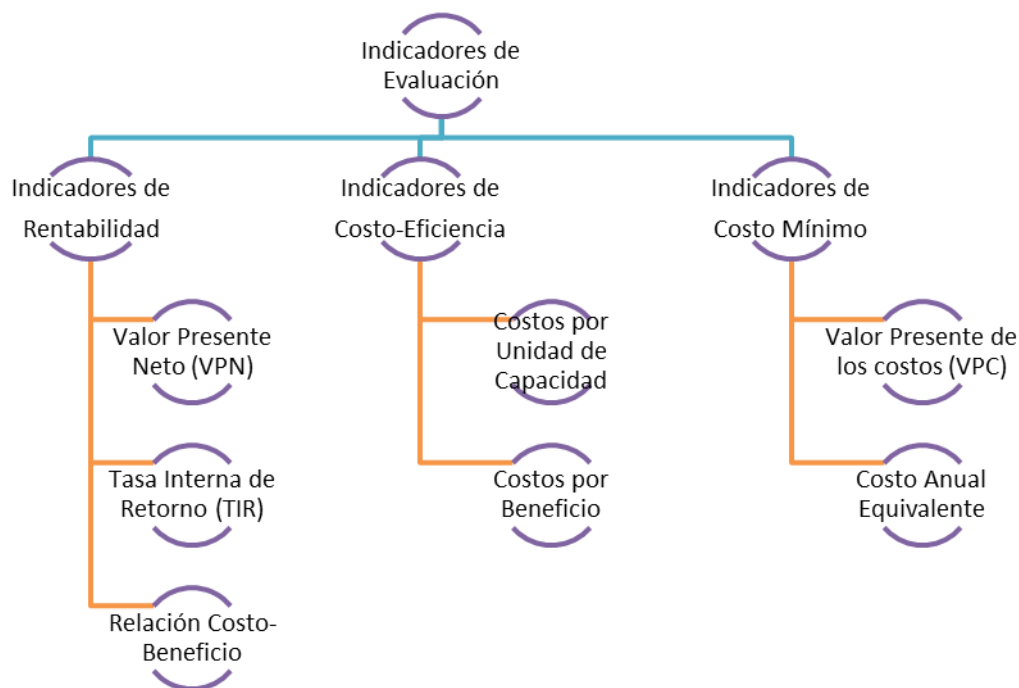


Figura 4. Indicadores de Evaluación (DPN, 2012)

A continuación se describen los conceptos presentados en el diagrama.

### 2.2.1.1 Indicadores de Rentabilidad

#### Valor presente neto (VPN)

El valor presente neto simplemente significa traer del futuro al presente cantidades monetarias a su valor equivalente. En términos formales de evaluación económica, cuando se trasladan cantidades del presente al futuro se dice que se utiliza una tasa de interés, pero cuando se trasladan cantidades del futuro al presente, como en el cálculo del VPN, se dice que se utiliza una tasa de descuento; por ello, a los flujos de efectivo ya trasladados al presente se les llama flujos descontados (Baca, 2007).

El valor presente neto se calcula con las siguientes ecuaciones:

$$VPN = VPB - VPC \quad (1)$$

$$VPN = \sum_{j=0}^n VFB \left[ \frac{1}{(1+i)^j} \right] - \sum_{j=0}^n VFC \left[ \frac{1}{(1+i)^j} \right] \quad (2)$$

También

$$VPN = \sum_{j=0}^n \text{Valores futuros} \left[ \frac{1}{(1+i)^j} \right] \quad (3)$$

Dónde:

VPB: Valor presente de los beneficios

VPC: Valor presente de los costos

VFB: Valor de flujo de beneficios

VFC: Valor de flujo de costos

n: Número de períodos de vida del proyecto

i: Tasa de recuperación mínima atractiva

El criterio para tomar decisiones con el VPN es si se está ganando más del rendimiento solicitado ( $VPN > 0$ ), se debe invertir; en caso contrario, es decir, cuando el proyecto no genera ni siquiera el rendimiento mínimo de ganancia solicitando ( $VPN < 0$ ), entonces se debe rechazar la inversión. Cuando el VPN es igual a cero se debe aceptar el proyecto, ya que se estaría ganando al menos la tasa que se fijó como mínima aceptable  $i$  (Baca, 2007).

### **Tasa Interna de Retorno (TIR)**

La Tasa Interna de Retorno TIR, se define como aquella tasa de descuento que al aplicarla al flujo de cada alternativa, da como resultado un Valor Presente Neto igual a cero.

$$VPN = 0 = \sum_{j=0}^n \text{Valores futuros} \left[ \frac{1}{(1+i)^n} \right] \quad (4)$$

Al igualar el VPN a cero, la única incógnita que queda es la  $i$ . Esta tasa se obtiene por iteración o de manera gráfica. El criterio para tomar decisiones con la TIR es si el rendimiento que genera el proyecto por sí mismo es mayor, o al menos igual a la tasa de ganancia que está solicitando el inversionista ( $TMAR^1 \leq TRI$ ), se debe invertir; en caso contrario, es decir, cuando el proyecto no genera ni siquiera el mínimo de ganancia que se está solicitando ( $TMAR > TRI$ ), entonces se debe rechazar la inversión (DPN, 2012).

### **Relación Costo-Beneficio (RBC)**

Para el cálculo de la Relación Costo-Beneficio a partir del Flujo Neto, se procede de la siguiente manera:

Cálculo del valor presente de los beneficios a partir de los valores positivos del flujo neto y cálculo del valor presente de los costos a partir de los valores negativos del

---

<sup>1</sup> TMAR: Tasa mínima aceptable de rendimiento.

flujo neto. La RBC es igual al Valor Presente de los Beneficios VPB sobre el Valor Presente de los costos VPC como se presenta en la siguiente ecuación:

$$RBC = \frac{VPB}{VPC} \quad (5)$$

El criterio para la toma de decisiones con RBC es que el proyecto es aceptable si RBC es mayor a uno ( $RBC > 1$ ); en caso contrario, si el proyecto no genera beneficios el RBC es menor a uno ( $RBC < 1$ ). Si la propuesta de inversión tiene una RBC igual a 1 es de esperarse que el proyecto alcance su punto de equilibrio, donde no se tiene una ganancia, ni una pérdida (DPN, 2012).

### **2.2.1.2 Indicadores de Costo - Eficiencia**

#### **Costo por Unidad de Capacidad**

Sirven para comparar alternativas en las cuales la medición de la capacidad y de los beneficios se logra en cantidades, más no en términos monetarios, además, se tienen los costos totales del proyecto. Estos indicadores se calculan con base en la suma tanto en la capacidad y los beneficios como en la suma total de los costos de la alternativa. No se deben actualizar los valores monetarios.

$$\text{Costos por capacidad} = \frac{\text{Total costos}}{\text{Total capacidad}} \quad (6)$$

El criterio para la selección de la alternativa será el que tenga menor costo por capacidad (DPN, 2012).

#### **Costo por Beneficiario**

Consiste en dividir el Valor Total de los Costos entre el Total de Beneficiarios. No se deben actualizar los valores monetarios.

$$\text{Costo por Beneficiario} = \frac{\text{Valor Total de los Costos}}{\text{Total de Beneficiarios}} \quad (7)$$

El criterio para la selección de la alternativa será el que tenga menor costo por beneficiario (DPN, 2012).

### **2.2.1.3 Indicadores de Costo Mínimo**

#### **Valor Presente de los Costos (VPC)**

El valor presente de los costos es un indicador de costos que permite traer a valor presente los costos de las alternativas en análisis para compararlas, partiendo del supuesto que los beneficios son pocos y difíciles de cuantificar. Habitualmente se realiza después de realizar el cálculo del VPN y que el resultado sea un  $VPN < 0$ .

$$VPC = \sum_{j=0}^n \left[ \frac{C_j}{(1+i)^j} \right] \quad (8)$$

Donde:

$C_j$ : Costos en determinado tiempo  $j$

$n$ : Número de períodos de vida del proyecto

$i$ : Tasa de recuperación mínima atractiva

El criterio para la selección de la alternativa será el que tenga menor Valor Presente de los Costos (Baca, 2007).

#### **Costo Anual Equivalente (CAE)**

Cuando nos enfrentamos a varias alternativas que solucionan un problema o necesidad, generando idénticos beneficios, se puede estimar el Costo Anual Equivalente CAE, indicador que sólo involucra los costos del proyecto. Este indicador puede utilizarse particularmente, cuando las alternativas producen iguales beneficios pero tienen distintas vidas útiles. Según este criterio se debe escoger la alternativa que tenga el menor CAE (Baca, 2007).

$$CAE = VPC \left[ \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (9)$$

### **2.2.2 Análisis de sensibilidad**

Los indicadores de evaluación mostrados se obtuvieron considerando los valores de costos y beneficios como los que probablemente corresponderán al desarrollo normal de los proyectos; sin embargo, durante la vida del proyecto estos valores pueden verse afectados por una diversidad de acontecimientos.

Es de esperarse que el precio del producto varíe, así como también el costo de materias primas, el de los servicios, el de mano de obra, etc., y cada una de estas variaciones repercutirá en los ingresos que se puedan captar, lo que llevará a situaciones diferentes que pondrán a prueba la solidez económica del proyecto.

El análisis de sensibilidad consiste en detectar los posibles cambios significativos que se manifiesten en los proyectos y se reflejen en los valores obtenidos por los indicadores, al aplicarlos bajo las nuevas condiciones económicas en que estén operando las plantas (Ciceri, 2009).



## **2.3 Evaluación de tecnologías**

### **2.3.1 Tecnología**

En términos generales, la tecnología puede definirse como el conjunto de conocimientos, procedimientos e instrumentos que le permiten a un equipo humano realizar una tarea. Para Visscher (2005), la tecnología es el resultado de la relación entre herramientas y tareas, es un producto que puede ser un elemento tangible o intangible generado porque el equipo humano ha tenido una razón fundamental o una motivación para resolver una tarea o problema, o para alcanzar una meta establecida (Montaña, 2010).

Toda tecnología consta no solamente del sistema físico sino también de elementos organizacionales para su manejo, requiere determinado tipo de personal para su administración, operación y mantenimiento, los cuales definen las necesidades de capacitación para facilitar la asimilación de la tecnología por la comunidad y, por lo tanto, asegurar su correcta operación y mantenimiento (Montaña, 2010).

### **2.3.2 Desarrollo de la metodología**

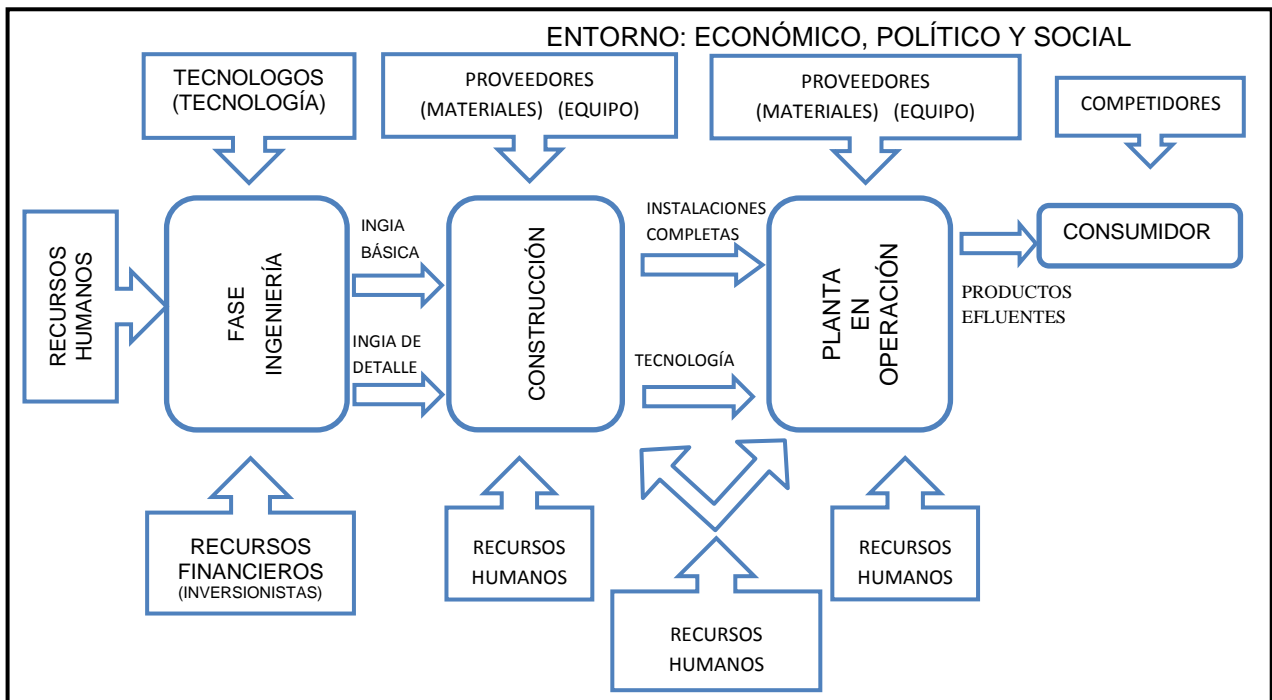
El desarrollo de un modelo de evaluación de alternativas tecnológicas puede realizarse mediante la ejecución de cuatro etapas:

- Identificación de criterios que afectan la selección de la alternativa tecnológica.
- Clasificación de todos los criterios identificados
- Formulación de un modelo en términos de la clasificación
- Cuantificación de los términos del modelo

Una forma de proponer los criterios y su clasificación sería mediante un proceso estadístico de los criterios que son propuestos en la bibliografía, sin embargo, hay que tener presente que se trata de proponer una metodología específica para evaluar alternativas tecnologías en proyectos de inversión de plantas de refinación, por lo que en su lugar se usa el enfoque de sistemas para este fin (Moreno, 1998).

La ejecución y operación de un proyecto de transformación aplicando el enfoque de sistemas, puede ser concebido como se muestra en la Figura 5. Esta figura es una visión ampliada del enfoque de caja negra del proceso de transformación. Tomando como base esta figura se puede abstraer la identificación de los siguientes criterios de evaluación, los cuales serán denominados en este trabajo como “aspectos”.

- Aspectos técnicos del proceso
- Aspectos técnicos complementarios
- Aspectos económico – financieros
- Aspectos contractuales
- Aspectos plausibles
- Aspectos estratégicos – tácticos
- Aspectos normativos



**Figura 5.** Visión amplia de un proyecto de transformación (Moreno, 1998).

A continuación se describen los aspectos incluidos en la metodología a realizar, presentados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Descripción de Aspectos de una Evaluación.

ASPECTOS	DEFINICIÓN
<b>(a) Aspectos técnicos del proceso</b>	En este inciso se consideran las características de la tecnología desde el punto de vista de proceso a nivel de ingeniería conceptual. Esto se realiza a través del análisis comparativo entre las alternativas tecnológicas ofertadas, estableciendo sus ventajas y desventajas, y tomando en cuenta el techo tecnológico como referencia.
<b>(b) Aspectos técnicos complementarios</b>	Se evalúa básicamente la experiencia de los diferentes tecnólogos, su capacidad organizacional, el tipo y alcance de los servicios ofertados, así como el contenido del paquete tecnológico (paquete de ingeniería básica, paquete de ingeniería de detalle, etc.), entre otros.
<b>(c) Aspectos económico - financiero</b>	Dada la estrecha relación que existe entre los criterios económicos y los financieros, se propone que estos sean agrupados en un solo aspecto. Este aspecto es de vital importancia, ya que define el nivel de recuperación de la inversión y de las utilidades esperadas cuando la planta esté en operación.
<b>(d) Aspectos contractuales</b>	En este aspecto se evalúan todos los factores que se toman como referencia para disponer de información suficiente para evaluar un borrador de los puntos importantes a incluir en las bases de diseño, se esperaría que éstos fuera en beneficio del Proveedor (adquiriente).
<b>(e) Aspectos plausibles</b>	En estos aspectos se agrupan los criterios macro-económicos, políticos, sociales y ecológicos que pueden afectar en la evaluación de un proyecto de inversión. Para identificar a estos aspectos se utiliza el término “plausibilidad” propuesto por Giral y Nieto (1977), ya que se considera que debido a que las plantas estarán inmersas en un entorno económico, social, político, etc., se recomienda que se analice si para el proyecto en cuestión son aplicables estos criterios.
<b>(f) Aspectos estratégicos-tácticos</b>	Este aspecto es de gran importancia ya que la tecnología que se adquiere debe ser congruente con la estrategia tecnológica; y está a su vez, como es sabido, debe ser congruente con la estrategia general del negocio. Además se incluyen en este grupo a los criterios tácticos (en donde se pueden considerar aspectos de logística), ya que éstos pueden tener un efecto en el buen desempeño del negocio.
<b>(g) Aspectos Normativos</b>	En este aspecto se agrupan los criterios que involucran la normatividad que puede regir un proyecto en sus diferentes fases, es decir, desde la licitación hasta la emisión de contaminantes cuando la planta esté operando.

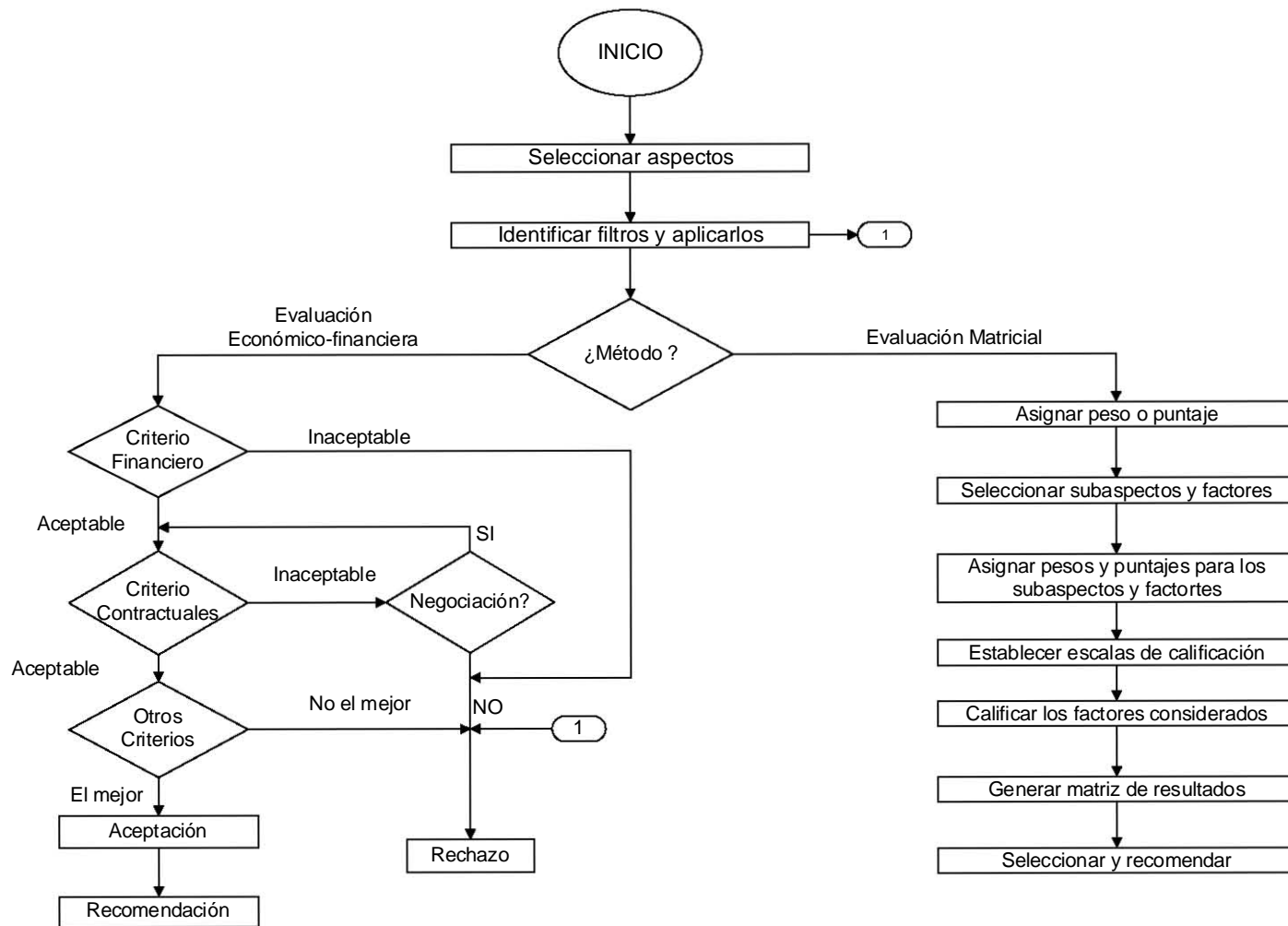
Es importante notar en los diferentes aspectos descritos anteriormente que tiene diferentes temporalidades, es decir, en algunos sus efectos son inmediatos; mientras que otros son a un corto plazo. Esta diferencia es la que ocasiona la dificultad de evaluar con certeza el funcionamiento del proyecto en el tiempo.

Además, si a esto se le agrega la confiabilidad de la información que los tecnólogos presentan, la confiabilidad de los estimados de inversión, la confiabilidad de los flujos de efectivo del proyecto, etc., es obvio que la evaluación no puede ser cien por ciento certera. Esto no quiere decir que los resultados de la evaluación no tienen aplicación, al contrario, se trata de aclarar que estos son representativos y que bajo este nivel de “representatividad”, las alternativas tecnológicas están siendo jerarquizadas.

La metodología propuesta toma como base que existen siete aspectos (técnico de proceso, técnico complementario, económico – financiero, contractual, plausibilidad, estratégico – táctico y normativo) que deben ser considerados en la evaluación de alternativas tecnológicas dentro de proyectos de inversión. Y se basa en la identificación de criterios restrictivos que pueden ser utilizados como “filtros”, que ayudan a la discriminación de las alternativas tecnológicas que se estén evaluando. Después de esta discriminación preliminar se puede pasar, en función de la información disponible, a una evaluación económico–financiera o una matricial. (Ver Figura 6)

La utilización de criterios restrictivos (filtros) para descartar desde el principio alternativas que no cumplan con las restricciones impuestas en las bases de concursos puede significar un ahorro de esfuerzos en el proceso de evaluación.

Por otro lado, esta metodología integral presenta la flexibilidad al poder seleccionar la técnica de análisis y comparación de alternativas con base en el tipo de proyecto y en la información disponible.



**Figura 6.** Diagrama para la selección y desarrollo de la metodología de evaluación (Moreno, 1998)

### 3. Caso de Estudio

El caso de estudio consiste en la inspección física del sistema de pretratamiento que opera en una Refinería para el suministro de agua clarificada a un sistema de desmineralización, donde se define si el sistema es adecuado para seguir operando o si es necesaria la instalación de otro sistema con principio de coagulación floculación. Donde la elección de otra tecnología es evaluada para realizar una propuesta al final de este trabajo.

El sistema de pretratamiento de agua cruda cuenta con un clarificador, un dosificador de desinfectante, un cuarto de dosificación de químicos, un tren de filtros de arena y un almacenamiento de agua clarificada.

El sistema es alimentado por agua cruda, proveniente de una laguna. Cada clarificador tiene una capacidad de 4,000 GPM y un máximo de 5,000 GPM y el tren de filtración tiene una capacidad de 8,250 GPM, para alimentar la planta de desmineralización.

**Tabla 6.** Parámetros del agua cruda a tratar.

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUA CRUDA	
		TEMPORADA DE ESTIAJE	TEMPORADA DE LLUVIAS
Temperatura	°C	32.6	29
pH	Unidades de pH	8.32	7.9
Conductividad	μS/cm	893	625
Turbidez	UNT	29	34
Sólidos suspendidos totales	mg/L	26.5	NA
DBO5	mg/L	2.7	1.8
DQO	mg/L	333.2	
Sólidos disueltos totales	mg/L	652	356
Coliformes fecales	NMP/100mL	9	4
Grasas y aceites	mg/L	47.7	

Datos obtenidos de históricos realizados por la UNAM, 2012

Los parámetros del agua cruda a tratar se presentan en la Tabla 6, donde se observa que el agua a tratar contiene una gran cantidad de sólidos disueltos totales, los cuales provocan problemas al sistema de desmineralización si el agua es alimentada sin un previo tratamiento. Además de microorganismos, y otros sólidos contenidos en el agua.

El objetivo principal de la clarificación del agua es eliminar los sólidos suspendidos que incluyen la materia orgánica, coloides y color, los valores máximos que debe contener el agua que se alimenta al sistema de desmineralización se presentan en la Tabla 7. En la evaluación se pretende que todos los sistemas a evaluar entreguen el agua con las especificaciones, de no ser así, el sistema es rechazado en la primera etapa de evaluación.

**Tabla 7.** Parámetros máximos de agua clarificada requerida

<b>PARÁMETRO</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>CONTENIDO MÁXIMO</b>
<b>Temperatura</b>	°C	25-30
<b>pH</b>	Unidades de pH	7.78
<b>Turbidez</b>	UNT	1
<b>Sólidos suspendidos totales</b>	mg/L	<2.0
<b>DQO</b>	mg/L	<10
<b>Sólidos disueltos totales</b>	mg/L	550
<b>Grasas y aceites</b>	mg/L	Ausente

Actualmente en el sistema de pretratamiento sólo se encuentra en operación uno de los clarificadores obteniéndose agua con la características presentadas en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Parámetros del agua clarificada obtenida actualmente

PARÁMETRO	UNIDADES	AGUA CLARIFICADA	
		TEMPORADA DE ESTIAJE	TEMPORADA DE LLUVIAS
Aforo	L/s	119	
Temperatura	°C	29.1	30.9
pH	Unidades de pH	7.12	7.78
Conductividad	µS/cm	813	609
Turbidez	UNT	4	8
DBO <sub>5</sub>	mg/L	ND	1.6
Sólidos disueltos totales	mg/L	ND	ND
Coliformes Fecales	NMP/100mL	ND	ND

ND: No definido o no detectable.

El sistema entrega agua de baja calidad debido a diversos problemas como: el sistema de rastras se encuentra oxidado y tocan el fondo del tanque provocando que los sólidos que se encuentran depositados suban a la superficie del clarificador.

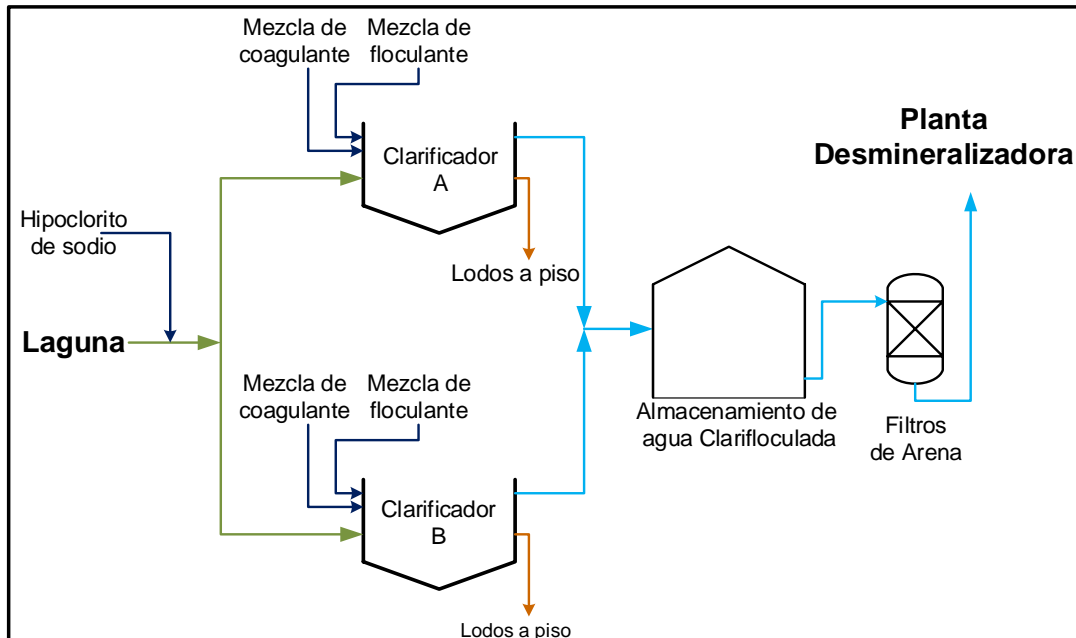
El sistema de dosificación cuenta con 4 tanques de mezclado con agitadores para la preparación de los químicos, de los cuales sólo funcionan dos tanques, por lo que sólo se adiciona sulfato de aluminio en el clarificador. Los flóculos que se generan en el clarificador no tienen el peso suficiente para poder precipitar debido a la falta de polielectrólito. Por lo que el agua clarificada que cae por medio de gravedad contiene sólidos suspendidos. Además, el tren de filtrado no funciona actualmente.

El agua que distribuye el sistema de pretratamiento no contiene las especificaciones que requiere el sistema de desmineralización provocando fallas en la operación.



### 3.1 Descripción del sistema de pretratamiento

El sistema de pretratamiento es alimentado por una laguna, antes de la llegada del agua cruda a los clarificadores se inyecta un desinfectante, bromo e hipoclorito de sodio, para la eliminación de microorganismos, hongos y algas contenidas en el agua. El diagrama del proceso se encuentra en la Figura 7.



**Figura 7.** Diagrama del sistema de pretratamiento actual

Cada clarificador tiene una capacidad de 4,000 GPM y un máximo de 5,000 GPM, el agua cruda entra al equipo y se adiciona sulfato de aluminio para llevar a cabo la coagulación y polielectrólito para la floculación en la cámara de reacción que se encuentra en el centro del clarificador y se produce un mezclado por medio del sistema de rastras. Los coágulos se precipitan formando una especie de colchón de lodos en la parte inferior del clarificador que es la zona de sedimentación.

La mezcla de los químicos que se agregan en el clarificador puede variar y es ajustado a través de la velocidad de la turbina ya que este puede ser alta o baja dependiendo de las muestras que se tomen, estas muestras sirven como indicativo para aumentar o disminuir la velocidad de la turbina con el fin de tener una concentración mayor de lodos en el fondo del tanque y una rápida

precipitación de los mismos. Esta velocidad variable provee un mejor manejo de estas mezclas de reactivos dentro de la zona de recirculación de reactivos o cámara de reacción.

**Tabla 9.** Clarificador

<b>Especificación</b>	<b>Valor</b>
<b>Marca</b>	BELCO
<b>Modelo</b>	CB-1030
<b>Tipo</b>	RECIRCULACIÓN DE LODOS
<b>Capacidad máxima</b>	5,000 GPM
<b>Capacidad normal</b>	4,000 GPM
<b>Temperatura normal</b>	27 °C
<b>Temperatura máxima</b>	33 °C
<b>Presión de entrada mínima</b>	30 Psia
<b>Presión máxima</b>	50 Psia
<b>Diámetro</b>	26 m
<b>Tiempo de retención</b>	160 minutos
<b>Flujo superficial</b>	1.2 GPM/ft <sup>2</sup>
<b>Concentración de lodos</b>	3 al 5 %
<b>Cuerpo</b>	Concreto
<b>Internos</b>	Acero al carbón

El área de pretratamiento también cuenta con 4 tanques agitadores: dos tanques en donde se prepara la solución de sulfato de aluminio y dos tanques donde se prepara el agente precipitador polielectrólito y de ellos succionan las bombas dosificadoras hacia los clarificadores.

Al salir el agua de las cámaras de reacción se encuentra clarificada, su turbidez se debe reducir de su estado natural de 26 NTU en épocas de lluvia y hasta 50 en época de estiaje a 3 o 1 NTU. El agua clarificada pasa por derrame a los tanques de almacenamiento donde es transportada por medio de bombas hacia los filtros de arena y presión, donde se filtra el agua clarificada. El agua filtrada entra como alimentación a la planta de desmineralización con valores menores de 3 NTU.

Antes de ser enviada el agua a la planta de desmineralización, es filtrada por medio de un tren de filtros de arena, para evitar que el agua enviada no contiene sólidos suspendidos. En la Figura 7 se presenta un esquema del sistema actual de

pretratamiento y en la Tabla 9 se presenta las especificaciones del clarificador actual.

### 3.2 Descripción de tecnologías a evaluar.

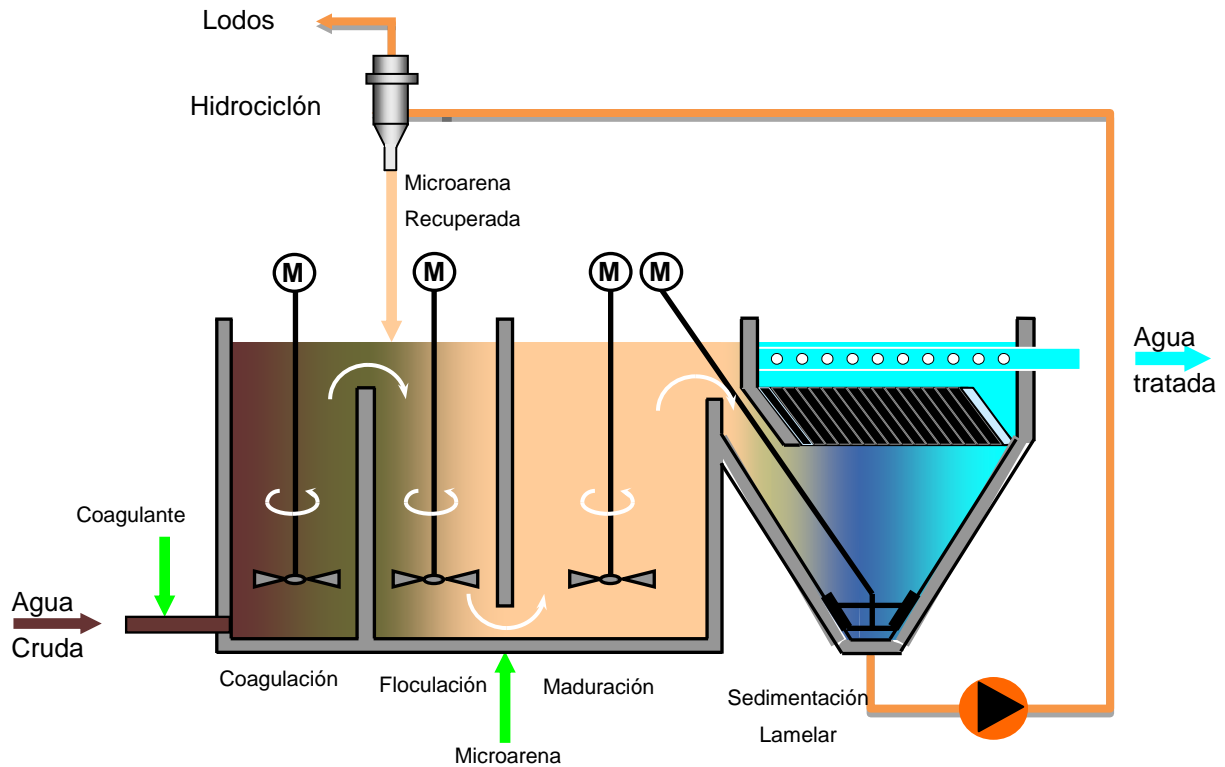
Se realizó una investigación de las nuevas tecnologías que se encuentran actualmente en el mercado, las cuales deben cumplir con el objetivo del sistema de pretratamiento, el cual es alimentar al sistema de desmineralización con los parámetros especificados en la Tabla 7. En la Tabla 10 se muestra un resumen de las tecnologías a evaluar.

**Tabla 10.** Descripción de tecnologías

TECNOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
<p style="text-align: center;"><b>1.</b> <b>Decantación lastrada</b></p>	<p>El proceso consta de las etapas de coagulación, floculación, maduración y decantación lamelar. En la etapa de floculación se añaden partículas de arena que permiten la formación de flóculos de mayor peso específico, aumentando la velocidad de decantación más que otros procesos convencionales.</p>
<p style="text-align: center;"><b>2.</b> <b>Coagulación- Floculación optimizada</b></p>	<p>El proceso consta de las etapas de coagulación, floculación y una sedimentación en dos secciones. En la etapa de sedimentación se tienen módulos laminares que aumentan el área de sedimentación para obtener una calidad superior de agua clarificada, además de una recirculación externa.</p>
<p style="text-align: center;"><b>3.</b> <b>Sedimentador de placas inclinadas</b></p>	<p>El proceso consta de la etapa de sedimentación donde el equipo tiene un 100% de área de contacto para lograr la sedimentación total de sólidos suspendidos contenidos en el agua. Para complementar el equipo se integran un sistema de mezclado para floculación y maduración de los flóculos al inicio del proceso. En la parte baja del sedimentador se tiene una tolva para espesar los lodos.</p>
<p style="text-align: center;"><b>4.</b> <b>Electrocoagulación</b></p>	<p>El proceso consta de las etapas de electrocoagulación y separación de sólidos por flotación o sedimentación. En la etapa de electrocoagulación la desestabilización de las partículas se da por la aplicación de una corriente eléctrica. Se utilizan productos químicos en menor cantidad y el área de instalación es menor que los sistemas convencionales.</p>

### 3.2.1 Decantación lastrada

El proceso consta de las etapas de coagulación, floculación, maduración y decantación Lamelar. En la etapa de floculación se añaden partículas de arena que permiten la formación de flóculos de mayor peso específico, que proporciona una superficie que facilita la floculación y actúa como lastre, aumentando la velocidad de decantación. En la Figura 8 se presenta el proceso.



**Figura 8.** Diagrama del proceso Decantación Lastrada

Eliminación en porcentaje.

Sólidos en suspensión y materia coloidal.....	90%
Fósforo, DQO, DBO.....	80%
Turbidez.....	99%

Los procesos optimizados que se llevan a cabo en el tratamiento:

- Precipitación química
- Floculación mejorada con microarena
- Sedimentación Lamelar

El proceso consta de las etapas de coagulación, floculación, maduración y sedimentación Lamelar. En la etapa de floculación se añade partículas de arena que permiten la formación de flóculos de mayor peso específico, aumentando la decantación 60 veces en comparación a los procesos convencionales.

El proceso incorpora un sistema de hidrociclón, que permite recuperar parte de la microarena para su continua reutilización en el proceso. La recirculación es de aproximadamente un 4 a 6 % del flujo de agua cruda. Es de importancia que la bomba de recirculación tenga un revestimiento de goma.

Los tiempos de retención en las etapas del proceso son de:

Coagulación.....2 min

Floculación.....2 min

Maduración.....6 min

Tasa de desbordamiento.....40-60 m/h

El consumo aproximado de los químicos es:

Coagulante.....10g Fe/m<sup>3</sup>

Floculante.....1 g/ m<sup>3</sup>

Microarena.....4 g/ m<sup>3</sup>

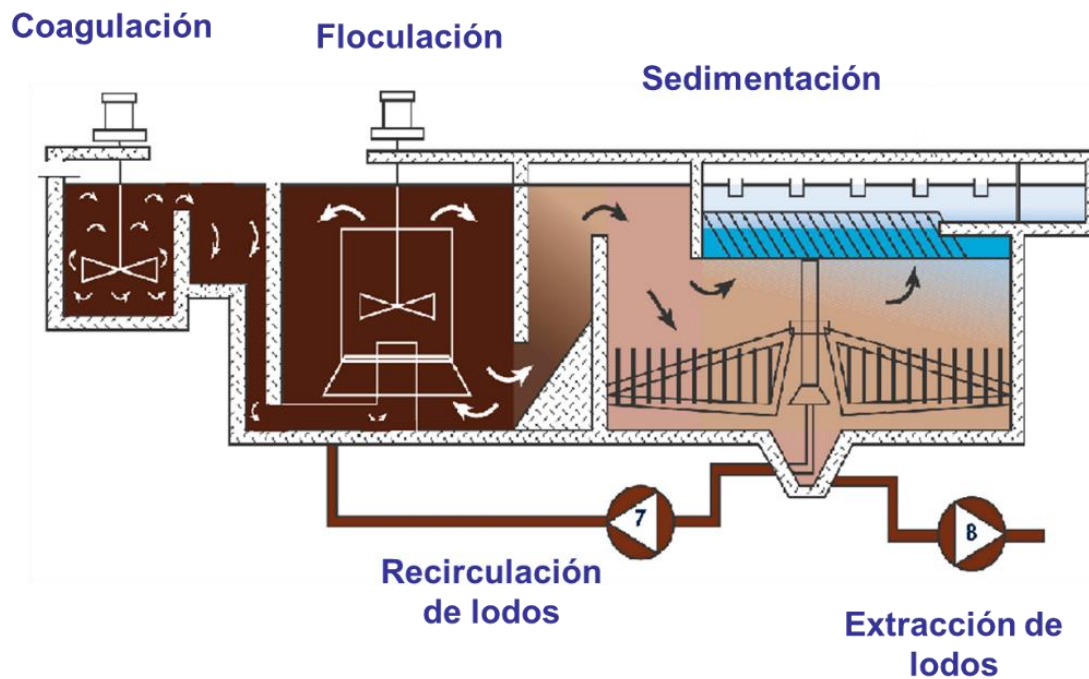
Además, el sistema cuenta con un equipo paquete para la recolección de lodos; en el Anexo V.a se presenta el diagrama de flujo. La disposición final de lodos queda a cargo de la Refinería.

### 3.2.2 Coagulación-Floculación optimizada

El proceso consta de las etapas de Coagulación, Floculación y sedimentación de laminar (Figura 9). El proceso combina la Sedimentación Lamelar, optimizada con una velocidad ascensorial elevada, con el espesamiento del lodo en el propio equipo.

Los principios de la coagulación-Floculación optimizada son:

- Una coagulación-floculación integrada, realizada en dos reactores en serie, uno agitado y de otro flujo ascendente.
- La reutilización de floculantes orgánicos sintéticos.
- Una transferencia reactor-decantador a baja velocidad conservando así la integridad de los flóculos.
- Una recirculación exterior de los lodos de la zona de espesamiento hacia el reactor.
- Una decantación lamelar optimizada.



**Figura 9.** Proceso de Coagulación-Floculación optimizada

Sus principales ventajas son las siguientes:

- Formación de un flóculo homogéneo y muy denso.
- Obtención de un grado de espesamiento definitivo en los lodos (entre 30 y 40 g/L).
- Excelente calidad del agua sedimentada.
- Gran inercia ante las variaciones de carga y de flujo.
- Economía en los reactivos del orden de 10 al 30% respecto a otros sedimentadores.
- La velocidad lamelar máxima es de 35 m/h y el agua tratada contiene <5 mg/L de sólidos suspendidos totales (SST).

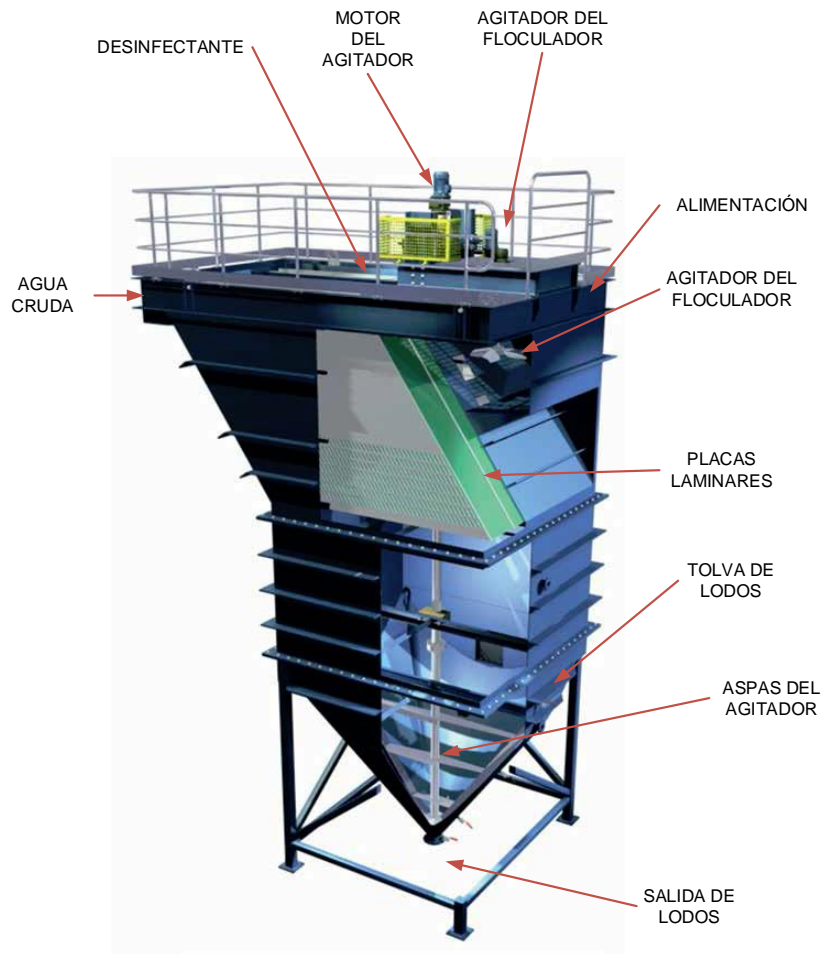
Es un sistema compacto y fácil de operar, que se basa en las ventajas de la recirculación de lodos y la sedimentación laminar. Con la recirculación de lodos, se optimiza el proceso de formación de flóculos, los cuales toman características que permiten su separación a velocidades mucho más altas que en los demás clarificadores.

La colocación de placas laminares en la parte superior del clarificador, permite que esta etapa final del proceso, en la que se separan las partículas más pequeñas, puede hacerse también a velocidades más altas, logrando simultáneamente un pulido del agua decantada, de manera que el contenido de sólidos en suspensión a la salida disminuye.

Además el sistema cuenta con un equipo paquete para la recolección de lodos en el Anexo V.b se presenta el diagrama de flujo. La disposición final de lodos queda a cargo de la Refinería.

### 3.2.3 Clarificación con sedimentación a contracorriente

El sistema ofrece un diseño integrado de mezclado/floculación para las instalaciones con espacios reducidos. El diseño se basa en la sedimentación a contracorriente. La corriente de alimentación se introduce al sedimentador por medio de un ducto de alimentación a la caja de alimentación, la cual es un canal sin fondo entre las secciones de placas. El flujo se dirige corriente abajo hacia placas con ranuras individuales de entrada lateral y se distribuye a través de todo lo ancho de las placas, fluyendo corriente arriba bajo condiciones de flujo laminar. En la Figura 10 se presenta el equipo principal del sistema de clarificación con sedimentación a contracorriente.



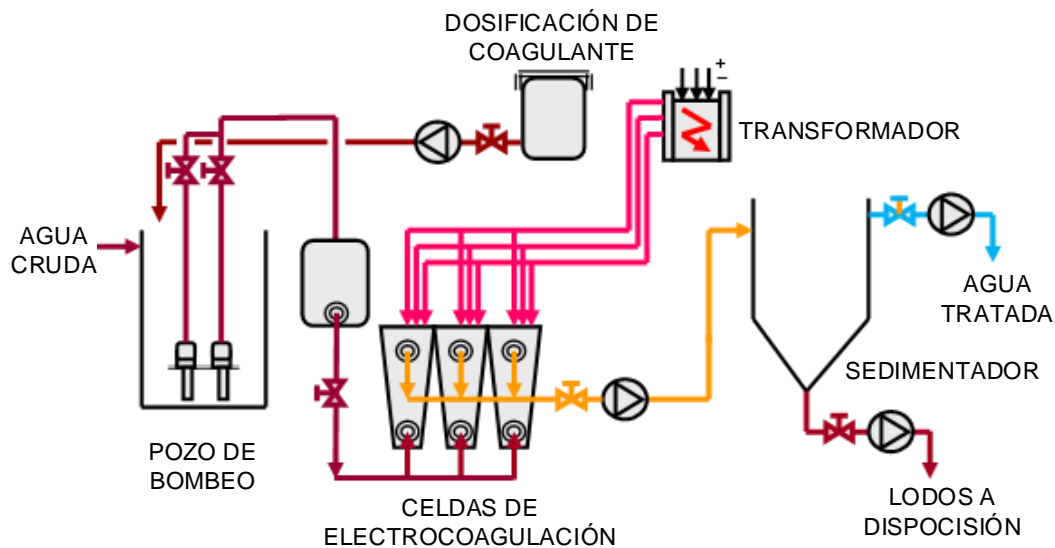
**Figura 10.** Equipo de clarificación con sedimentación a contracorriente.



El sedimentador por Gravedad requiere solo de un décimo del espacio que los equipos convencionales de clarificación, con la misma capacidad de decantamiento. Esto significa una sedimentación más rápida debido al área efectiva de sedimentación por gravedad del diseño de placa inclinada que equivale a la superficie de cada una de las placas proyectadas en una superficie horizontal. Hasta diez pies cuadrados del espacio físico ocupado por la unidad.

### 3.2.4 Electrocoagulación

El proceso está compuesto por tanques de acondicionamiento, donde se agrega la sal que lo convierte en un electrolito conductor de corriente eléctrica; un reactor que contenga las celdas electroquímicas y sedimentador. El esquema de la planta se presenta en la Figura 11.



**Figura 11.** Proceso de electrocoagulación

La eficiencia de la remoción del proceso es de 92.5% SST y 98 %DBO<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> D.I.A. "Optimización del sistema de Tratamiento de Residuos Industriales Líquidos de Copiulemu S.A.". Anexo B "Antecedentes Técnicos-Planta de Tratamiento Oxidación Avanzada"

Uso de reactivos en el sistema es de 0.01 g Fe/m<sup>3</sup>, para un uso óptimo de reactivos químicos. El consumo de energía eléctrica para el sistema de electrocoagulación es de 0.1 a 1.0 KWH/m<sup>3</sup>.

Los electrodos seleccionados para el sistema son seleccionados según el efluente a tratar, para el ánodo pueden ser de grafito o metálicos y para el cátodo de placas de acero inoxidable. El desgaste de los electrodos es demasiado, por lo que se debe realizar un cambio de electrodos cada 2 veces al año.

La operación funciona en forma automática. El proceso no genera gran cantidad de lodos en comparación de los sistemas convencionales de clarificación.

En la Tabla 11 se presenta en resumen las ventajas y desventajas de los sistemas a evaluar.

**Tabla 11.** Ventajas y desventajas de las tecnologías

TECNOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Decantación lastrada</b>	Calidad de agua producida. Flexibilidad de operación y velocidad de estabilización (autoajuste) del sistema a diferentes calidades de agua de entrada. Menor consumo de electricidad. Disponibilidad de partes de repuesto. Alta velocidad de asentamiento. Menor área de instalación.	Mayor consumo de reactivos. Requiere de mayor cantidad de instrumentos. Se requiere de capacitación especializada para esta tecnología.
<b>Coagulación-Floculación optimizada</b>	Calidad de agua producida. Menor consumo de reactivos. Disponibilidad de partes de repuesto.	Mayor consumo de electricidad. Se requiere de mayor capacitación especializada para esta tecnología. Mayor área de instalación.
<b>Clarificación con sedimentación a contracorriente</b>	Calidad de agua producida. Menor área de instalación	Mayor consumo de reactivos.
<b>Electrocoagulación</b>	Calidad de agua producida. Menor área de instalación. Menos consumo de electricidad. Menor consumo de reactivos, lo que provoca menores residuos sólidos.	Se tiene un proceso batch, lo que indica menor volumen de agua tratada. Mayor área de instalación con respecto a las otras tecnologías. No se encuentra en el mercado para el volumen a tratar.

## 4. Metodología



**Figura 12.** Diagrama de la metodología aplicada a este caso de estudio.

La necesidad del pretratamiento de agua cruda depende no sólo del destino del agua clarificada a la planta de desmineralización, sino de la disponibilidad de agua para usos generales y el uso en torres de enfriamiento, ya que el agua es indispensable para los procesos que se llevan a cabo en la Refinería. La disponibilidad de agua de buena calidad es un factor crítico para el desarrollo de varias actividades y es considerado como un servicio indispensable en la Refinería.

En este capítulo se desarrolla una metodología fundamentada en:

1. Inspección física del sistema de pretratamiento.
2. Análisis de aplicación de las principales tecnologías de tratamiento de agua cruda.
3. El desarrollo de la metodología matricial para la evaluación de tecnologías.

De acuerdo a la metodología, como primer paso se debe realizar un estudio de la problemática que presenta el sistema de pretratamiento, mediante la inspección física detallada del sistema. Posteriormente se realiza un estudio de las tecnologías disponibles para la resolución de la problemática presentada anteriormente. Se obtuvo un listado de las posibles tecnologías a aplicar, previo análisis que garantice que dichas tecnologías cumplan con lo requerido para dar solución a la problemática, para posteriormente llevar a cabo la evaluación matricial.

En la evaluación matricial se desarrollaron los aspectos y subaspectos a evaluar, asignando un puntaje de calificación para cada rubro propuesto para la evaluación, estableciendo una escala de calificación para los factores considerados. Con esto se generó una matriz de resultados para seleccionar y recomendar la tecnología más adecuada al caso de estudio.

## 4.1 Inspección física

Se realizó una inspección visual considerando las siguientes etapas del sistema de pretratamiento.

- Sistema de preparación y dosificación de reactivos: Este sistema se encuentra en un edificio, por lo que se consideró revisar la estructura de dicho edificio, tanques de mezclado, bombas de dosificación de reactivos y sistema de distribución de reactivos hacia los clarificadores.
  
- Sistema de clarificación: La inspección comprende el cuerpo central, la estructura del cono y las rastras del equipo.
  
- Sistema de tratamiento y/o disposición de lodos: Se revisó la eficiencia del equipo con respecto a la generación actual de lodos y se evaluó el tratamiento y la disposición de los mismos.
  
- Sistema en general: Comprende la inspección de todos los espacios del área de pretratamiento para la implementación de equipo nuevo de acuerdo a la tecnología que se propone.

## **4.2 Elaboración de la metodología propuesta para la selección de tecnología de Pretratamiento de agua cruda en una refinería.**

El objetivo principal de la metodología desarrollada a continuación, es eficientar, facilitar y estructurar el proceso de selección de una tecnología para el pretratamiento de agua cruda con el fin de disminuir problemas en calderas, torres de enfriamiento y usos generales en una Refinería provocados por el uso de agua de baja calidad, que no cumple con la norma establecida.

En la metodología propuesta, como primer paso hay que identificar los objetivos definidos para una planta de pretratamiento de agua y está relacionado con las características de las tecnologías estudiadas. Como segundo paso se debe identificar y definir los aspectos a evaluar que se emplean en el proceso de selección de las alternativas tecnológicas que ayuden en la elección de la mejor tecnología a aplicarse.

Como principales objetivos del sistema de pretratamiento de agua cruda se consideran:

- Eliminar la turbidez, color, sólidos en suspensión y parcialmente la dureza y alcalinidad del agua. Obteniendo una calidad de agua presentada en la Tabla 7.
- Reducir los costos de mantenimiento para el sistema de desmineralización, torres de enfriamiento y servicios generales.
- Reducir las descargas del lavado de resinas.

En el caso específico de la reutilización del agua tratada, los objetivos particulares que se consideran generalmente son los siguientes:

- Definir cuál es la calidad de agua requerida para el caso de estudio.
- Describir las necesidades de tratamiento.
- Definir si el suministro es suficiente para cubrir la demanda de agua clarificada en la refinería.
- Definir los beneficios del abastecimiento de agua clarificada.

#### 4.2.1 Identificación y definición de los aspectos a considerar dentro la evaluación.

Los aspectos de selección de una tecnología para el pretratamiento de agua cruda deben estar enfocados de manera general en los siguientes:

- a) **Eficiencia promedio o típica y el funcionamiento:** Este es el aspecto de mayor importancia que se considera en los estudios de comparación de tecnologías. También se debe considerar la posibilidad de que la tecnología sea capaz de remover otros contaminantes además de aquellos para los que fue diseñada. Así mismo debe tomarse en cuenta el destino final de los contaminantes removidos como factor clave, en especial con las opciones de disposición de lodos.
  
- b) **Rentabilidad de la tecnología:** El proceso preferentemente debe ser capaz de soportar cambios en la carga de sólidos suspendidos y turbidez a tratar, es decir, el sistema debe seguir operando bajo condiciones inusuales y producir un efluente con la calidad requerida. De manera que el sistema debe considerar tanto las condiciones normales como las variaciones en las características del influente. Durante la fase de diseño es importante considerar que una vez presentada una contingencia, el proceso debe ser fácil de corregir y reiniciar.
  
- c) **Sustentabilidad financiera:** A menores costos de financiamiento, será más atractiva la tecnología. Sin embargo, una opción con costo bajo no necesariamente es financieramente sustentable ya que esto se encuentra determinado por la disponibilidad de fondos que aporte el emisor.

- d) **Opciones de reutilización:** De esta manera se contribuye a la recuperación de recursos y del ambiente; es también una opción para la sustentabilidad financiera.
- e) **Normatividad:** Cumplimiento de la normatividad referente a la calidad del agua del cuerpo receptor y el cumplimiento de los parámetros para su reutilización.

#### 4.2.2 Aspectos seleccionados para la evaluación.

Definido lo anterior, en la Tabla 12 se presentan los aspectos a considerar en la evaluación.

**Tabla 12.** Aspectos a considerar en la evaluación

Aspectos (Ai)	Decisión
<b>Evaluación técnica del proceso</b>	Si
<b>Evaluación de aspectos técnicos complementarios</b>	Si
<b>Evaluación económico-financiera</b>	Si
<b>Evaluación de aspectos plausibles</b>	No
<b>Evaluación contractual</b>	No

Es importante señalar que la parte importante de la evaluación de tecnologías, consta del aspecto técnico del proceso y del aspecto económico-financiero. Ya que lo que se busca es una mejora en el proceso a un costo bajo y obteniendo un beneficio.

Los aspectos contractuales y plausibles se evalúan para proyectos de inversión con un enfoque macro-económico, político y social, por lo que no son considerados de mayor importancia dado que se busca analizar las bondades de la tecnología misma y no relacionado con la procura o evaluación de proveedores en el presente trabajo.



### 4.2.3 Descripción de los aspectos, subaspectos y factores de evaluación.

. Los aspectos que se consideran en la evaluación se presentan a continuación. Para facilitar el proceso de selección se adoptó una clasificación de subaspectos y factores para cada aspecto.

#### 4.2.3.1 Aspectos técnicos del proceso.

Estos aspectos consideran las características de la tecnología desde el punto de vista de proceso. Las características técnicas de las diferentes tecnologías influyen directamente en el costo de inversión y mantenimiento de una planta de pretratamiento de agua cruda en una Refinería. En la Tabla 13 se presentan los subaspectos y factores de evaluación que han sido adoptados para seleccionar las tecnologías para el pretratamiento de agua.

**Tabla 13.** Subaspectos y factores de los Aspectos Técnicos del proceso.

SUBASPECTOS	FACTORES
<b>a. Concordancia del proceso con las bases de diseño</b>	-Capacidad requerida. -Velocidad de sedimentación. -Calidad requerida del agua tratada. -Condiciones de límite de batería.
<b>b. Características relevantes del proceso</b>	-Condiciones de operación. -Pre o post tratamiento necesarios. -Equipos adicionales.
<b>c. Características específicas de la tecnología</b>	-Área requerida total y número de módulos. -Vida útil. -Sistemas de seguridad.
<b>d. Flexibilidad del proceso.</b>	
<b>e. Impacto ecológico de la tecnología.</b>	-Residuos generados. -Producción de ruido.

A continuación se desarrollan los subaspectos y factores de evaluación.

**a) Concordancia del proceso con las bases de diseño.**

**Capacidad:** es importante que el equipo propuesto para la mejora del sistema cumpla con la capacidad requerida de 8,000 GPM. Sí el equipo cuenta con la capacidad requerida obtendrá una calificación de 5 y sí el equipo no cuenta con la capacidad requerida obtendrá una calificación de 0. Este factor se considera en la primera etapa de la evaluación.

**Velocidad de sedimentación:** Este es uno de los factores importantes del proceso para la selección de la tecnología. El equipo que tenga una mayor velocidad de sedimentación obtendrá la calificación mayor en este factor.

**Calidad del agua tratada:** El proceso de pretratamiento de agua cruda debe cumplir con los parámetros que son establecidos en la Tabla 7. La tecnología que se evalué debe cumplir, si no es así, la tecnología es rechazada en la primera etapa, donde se aplican los primeros filtros para la evaluación.

**Condiciones de límite de batería:** El proceso de pretratamiento de agua cruda comprende desde la alimentación de agua cruda (influyente), hasta la entrega de agua clarificada (efluente). El pretratamiento debe de contar con un equipo de dosificación de reactivos, un sistema que cumpla con el proceso de clarificación y un sistema de tratamiento de los residuos sólidos que se produzcan durante el proceso. Sí la tecnología que se propone cuenta con equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de clarificación obtendrá la calificación de 5, mientras que la tecnología que requiera de mayor equipos a parte de los que está proponiendo va disminuyendo la calificación a obtener. El factor es subjetivo por lo que se requiere explicar al momento de la evaluación la calificación que se otorga a cada tecnología.

### **b) Características relevantes del proceso.**

**Condiciones de operación:** Para el proceso de clarificación una de las condiciones de operación importantes para evaluar la tecnología, es el tiempo de residencia. Debido a que por medio de este se define el área del equipo y mientras menor sea el tiempo, el equipo será pequeño para tratar un gran flujo de agua cruda. Por lo tanto, se calificará con mayor puntuación al equipo con menor tiempo de residencia.

**Pre o post tratamiento necesarios:** El pretratamiento además de incluir en el paquete un sistema de clarificación, este también debe contener un sistema de filtración para tener la certeza de que se entrega agua sin presencia de sólidos suspendidos. Adicionalmente, debe tener un tratamiento para los lodos producidos en el sistema de decantación. La calificación más alta se asignará a la tecnología que requiera del menor uso de pre y post tratamiento, debido a que el área de instalación es limitada.

**Equipos adicionales:** El sistema debe contener el menor número de equipos, debido a que es favorable contar con una operación simple y eficientar el espacio que se tiene. Se evaluará con mayor calificación la tecnología que cuente con un menor número de equipos en su sistema.

### **c) Características específicas de la tecnología**

**Área requerida total y número de módulos:** Se refiere al área total que se requiere para la instalación de todo el sistema de pretratamiento, mientras menor sea el número de módulos, el proceso es menos complejo y el área será menor. Si el área requerida para la instalación es menor, la calificación que se otorga es mayor.

**Vida útil:** Se refiere a cuánto tiempo durará operando el sistema de pretratamiento de agua cruda. Para una obra, como un sistema de tratamiento de aguas generalmente hay dos partes en la división en la vida útil de ésta, la primera se refiere a la vida útil de la infraestructura (obra civil, eléctrica, tuberías, sistema de

control) y la segunda, a los equipos rotatorios expuestos a un mayor desgaste por lo que tienen una vida útil menor. Con base a los equipos que se proponen, se realizará un listado de equipos y obtener un promedio de vida útil que impacte a la tecnología en general. Se evaluará con mayor calificación aquella tecnología que cuente con mayor tiempo de vida útil.

**Sistemas de seguridad de operación:** Se refiere a la protección de los equipos mecánicos, si requieren de algún sistema para la protección de bombas, agitadores. Es preferible que los equipos que se proponen no requieran de una mayor atención, por lo que se evaluará con mayor calificación si los equipos no son complejos en su operación y mantenimiento.

**d) Flexibilidad del proceso.**

La operación debe ser flexible refiriéndose al flujo y calidad de agua cruda, es importante que la operación sea controlada cuando se presente una variación en estos parámetros. Este factor se evaluará con mayor calificación si presenta un rango amplio en la velocidad de sedimentación, debido a que si el rango es alto el equipo puede tener variaciones en los parámetros antes mencionados.

**Impacto Ambiental.**

**Residuos generados:** La tecnología que genere menor cantidad de residuos obtendrá mayor calificación.

**Producción de ruido:** Un equipo ruidoso en plantas es una limitante para su aceptación, debido a que se requiere forzosamente equipo de seguridad auditiva para su operación, además de problemas de salud para el operador a largo plazo.

#### 4.2.3.2 Aspectos técnicos complementarios

Estos aspectos consideran las características de la tecnología desde el punto de la experiencia del tecnólogo con la tecnología y productos relacionados con el tema. En la Tabla 14 se presentan los subaspectos de evaluación que pertenecen a los aspectos complementarios.

**Tabla 14.** Definición de los subaspectos técnicos complementarios.

SUBASPECTOS	DEFINICIÓN
<b>a) Experiencia del licenciador</b>	En este subaspecto se califica la experiencia del proveedor. Sí el proveedor cuenta con 10 plantas de pretratamiento instaladas en todo el mundo, obtendrá una calificación de 5, sí el proveedor cuenta con 5 plantas instaladas, obtendrá una calificación de 3 y si el proveedor no tiene instalada la planta obtendrá una calificación de 1 ó 0 dependiendo si tiene planta piloto con buenos resultados.
<b>b) Información técnica</b>	Es importante que la información técnica del proceso se encuentre disponible para tener un manejo adecuado del sistema. Se evaluará con mayor puntuación la tecnología que aporte mayor información técnica disponible.
<b>c) Certificación del sistema de aseguramiento de calidad</b>	Sí la planta a instalar cuenta con la certificación correspondiente y cumple con la normatividad, obtendrá como calificación 5. Si no es así, la calificación que obtendrá sería de 0.

#### 4.2.3.1 Aspectos económicos.

Estos aspectos consideran los costos que se presentan para implementar una de las opciones para la modernización de la planta de pretratamiento. En la Tabla 15 se presentan los subaspectos y factores de evaluación que han sido adoptados para seleccionar las tecnologías para el retratamiento de agua.

**Tabla 15.** Subaspectos y factores de los aspectos económicos.

SUBASPECTOS	FACTORES
a) Inversión	
b) Requerimientos de servicios auxiliares	-Energía Eléctrica -Químicos -Mantenimiento
c) Parámetros de rentabilidad del proyecto	-Valor presente de costos -Costo anual equivalente
d) Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto	-Inversión -Insumos -Operación y mantenimiento

A continuación se desarrollan los subaspectos y factores de evaluación.

##### a) Inversión

Es importante para la evaluación de un proyecto ver el costo de inversión, con esto se observa si el proyecto es costeable y rentable. En toda evaluación, si el costo de inversión es menor se obtendrá la mayor calificación y viceversa.

##### b) Requerimientos de servicios auxiliares

Los factores que implican en el subaspecto son la energía eléctrica, los químicos y el mantenimiento. Cada factor se evaluará con la mayor calificación si el costo por cada uno es menor.

**c) Parámetros de rentabilidad del proyecto**

**Valor presente de costos (VPN):** Se evaluará con mayor calificación al que presente un mayor VPN. Para mayor información referirse al apartado 2.2.1.1 Indicadores de Rentabilidad.

**Costo Anual Equivalente (CAE):** Se evaluará con mayor calificación al que presente un menor CAE. Para mayor información referirse al apartado 2.2.1.3 Indicadores de Costo Mínimo.

**d) Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto**

Al evaluar este subaspecto se debe considerar que la sensibilidad es menor en cada uno de los factores (inversión, insumos, operación y mantenimiento) para obtener una mayor calificación. Para mayor información referirse al apartado 2.2.2 Análisis de sensibilidad.

#### 4.2.4 Definición de criterios restrictivos.

De un análisis de los subaspectos y factores que conforman un aspecto principal, se escogieron los criterios restrictivos presentados en la Tabla 16, para realizar la primera selección de las tecnologías que serán sometidas a una evaluación matricial.

**Tabla 16.** Criterios restrictivos

Criterio	Valor
<b>Capacidad de la unidad</b>	8,000 GPM
<b>Calidad del agua a la entrada</b>	Turbidez Máx de 300 NTU
<b>Calidad requerida del agua tratada</b>	Turbidez < 1 NTU
<b>Área de instalación requerida</b>	Área < 1,000 m <sup>2</sup>

Otro aspecto que deberá ser considerado como criterio restrictivo en un caso real es el alcance del paquete de ingeniería básica y servicios adicionales solicitados (Ingeniería, diseño, construcción, obra hidráulica, obra eléctrica, montaje, suministro de partes de repuesto para el arranque, pruebas de arranque, puesta en marcha, entrenamiento teórico-práctico para la operación y mantenimiento del sistema, garantía de funcionamiento y eficiencia).

En la Tabla 17 se presenta los filtros aplicados a las tecnologías estudiadas en este trabajo.

**Tabla 17.** Criterios restrictivos aplicados a las tecnologías.

Filtro	1	2	3	4
<b>Capacidad de la unidad</b>	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Calidad del agua a la entrada</b>	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Calidad requerida del agua tratada</b>	Cumple	Cumple	Cumple	Cumple
<b>Área de instalación requerida</b>	Cumple	Cumple	No cumple	No cumple



De acuerdo a la información recabada de cada tecnología se aplicaron los criterios y dos de las tecnologías propuestas cumplen con los criterios restrictivos impuestos. La tecnología decantación lastrada y coagulación-floculación optimizada pasan a la siguiente etapa de evaluación. La Clarificación con sedimentación a contracorriente no cumple con el área de instalación requerida al igual que la electrocoagulación, además que la tecnología no está desarrollada a nivel industrial, solo se encontró diseñado en planta piloto.

De acuerdo a lo presentado en esta Tabla 17 que se encuentra con base al caso de estudio, la evaluación matricial se aplicará únicamente a las tecnologías 1 y 2.

#### 4.2.5 Asignación de puntaje a cada aspecto a evaluar

En la técnica matricial (la cual corresponde a un método cualitativo), se procede a asignar un puntaje a cada uno de los aspectos considerados ( $P_i$ ).

En donde

$$1,000 = \sum P_i$$

El peso acordado para cada uno de los aspectos a evaluar se presenta en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Puntaje de los aspectos en la evaluación.

Aspectos	Puntaje (%)
<b>Aspectos técnicos de proceso</b>	35
<b>Aspectos técnicos complementarios</b>	25
<b>Aspectos económico-financiero</b>	40
<b>Total</b>	<b>100</b>

El aspecto que mayor puntaje tiene es el económico-financiero, ya que en este grupo se va a evaluar la economía intrínseca del proceso, en la cual de acuerdo al enfoque de sistemas como caja negra se deben de ver reflejadas las ventajas de las tecnologías. Es decir, si una tecnología es líder debe mostrar ventajas tanto en rendimiento de productos como en el consumo de servicios auxiliares.

Los aspectos técnicos de proceso son considerados en segundo orden de prioridad ya que es de suma importancia que se cumplan con ciertos requerimientos en el proceso para cumplir con los objetivos de la instalación de la nueva tecnología para el pretratamiento de agua cruda. En último lugar se consideraron los aspectos técnicos complementarios ya que las tecnologías que serán evaluadas son de proveedores bien posicionados en el mercado.

El puntaje para los subaspectos y factores se asignan de acuerdo a los requerimientos del caso de estudio. A continuación, se presenta una lista de los requerimientos del caso de estudio.

- ❖ Se busca la calidad de agua presentada en la Tabla 7.
- ❖ Se requiere que el área a disponer para la instalación del equipo sea mínima, ya que el espacio que se tiene en el caso de estudio es de 1,000 m<sup>2</sup>.
- ❖ El sistema debe tener un mínimo consumo de productos químicos. Actualmente se utiliza 695 mg/m<sup>3</sup> de coagulante.
- ❖ El sistema debe tener un mínimo consumo de servicios auxiliares.
- ❖ El sistema debe contener un sistema de tratamiento de lodos.
- ❖ El costo de los reactivos químicos debe ser menor, para evitar que en un futuro la operación mantenga las condiciones necesarias para que el tratamiento se lleve correctamente y no sea un problema el consumo de reactivos.
- ❖ El mantenimiento debe ser mínimo para el sistema a instalar. Además se debe considerar la limpieza del equipo.
- ❖ La operación del sistema debe ser automático y fácil de manejar.
- ❖ Disponibilidad del equipo y refacciones.
- ❖ El sistema debe ser económicamente viable.

Considerando lo anterior como puntos importantes para la toma de decisión en la evaluación de tecnologías. El porcentaje o puntaje para cada subaspectos y factores es el que se presenta en cada tabla de resultados.

#### 4.2.6 Escala de calificación (Ci)

Establecer una escala de calificación (Ci) y características máximas y mínimas de los factores considerados. Se considera utilizar la escala del 0 al 5 en donde los valores 2 y 4 no son considerados. La escala propuesta a utilizar es de la metodología presentada por McConell y Khalil (1988), para calificar los atributos de los factores. Esta forma de asignar calificación permite una mejor diferenciación [Aguilar, 1998]. Ver la Tabla 19.

**Tabla 19.** Escala de calificación de atributos.

Descripción	Calificación
<b>Atributo no disponible</b>	0
<b>Calificación mínima / Atributo muy pobre</b>	1
<b>Calificación media / Atributo promedio</b>	3
<b>Calificación máxima / Atributo muy bueno</b>	5

## 5. Resultados

### 5.1 Inspección física del sistema de pretratamiento

Se realizó la inspección física para evaluar los aspectos generales referentes a la operación y mantenimiento de los siguientes sistemas:

- sistema de dosificación de reactivos
- sistema de clarificación
- sistema de tratamiento y/o disposición final de lodos
- sistema de filtración del agua clarificada.

En la Tabla 20 se presenta un resumen de los resultados de la inspección realizada en el sistema de pretratamiento de agua cruda referente al caso de estudio.

**Tabla 20.** Desviaciones encontradas en el sistema de pretratamiento para el caso de estudio.

No.	Operación Normal o de Diseño	Desviación o Hallazgo encontrado	Observaciones
1	Sistema de dosificación: (2) Tanques de mezclado de coagulante con bombas de dosificación cada uno. (2) Tanques de mezclado de floculante con bombas de dosificación cada uno.	Solo operan: (1) Tanque de mezclado de coagulante con una bomba de dosificación y una de relevo.	La falta de un tanque de mezclado de floculante ocasiona que los flóculos que se forma y no tengan el peso suficiente para sedimentar.
2	Sistema de Clarificación : (2) Clarificadores con una capacidad de 4,000 GPM.	Solo operan: (1) Clarificador a su capacidad máxima de 5,000 GPM.  No cuenta con sistema de tratamiento y/o disposición de lodos.	El clarificador que se encuentra fuera de operación presenta oxidación en cono, cámara de reacción y rastras. Las rastras se encuentran desniveladas y rosan con el clarificador. Con esto se tiene una idea del otro clarificador operando.  Ocasionando acumulación de lodos en el área de pretratamiento.
3	Sistema de filtros de gravedad: (1) Tren de filtración del agua clarificada con una capacidad de 8,250 GPM.	Se encuentra sin operar por falta de mantenimiento.	No se da tratamiento adecuado al agua clarificada que se suministra al sistema de desmineralización, para eliminar la materia suspendida en el agua.

Es complementado con las fotografías que se presentan en el Anexo I, se puede decir que es evidente la falta de mantenimiento en los tanques de mezclado, lo que ha provocado oxidación, perforación en las bases y falta de motores de los agitadores. Las líneas de succión y descarga del sistema de dosificación presentan diferentes tipos de material. Además de la falta de mantenimiento existen fugas en las líneas y taponamientos en las tuberías.

Aunque existen dos clarificadores, actualmente, solo está en operación el clarificador WL-100 B en el cual se observa la presencia de materia flotante en la superficie. El clarificador WL-100 A se encontraba en mantenimiento en el momento de la inspección; sin embargo, se pudo observar inclinación del cono, oxidación en el interior y en los tensores del mismo, en el caso del cuerpo central, existe corrosión, y las rastras se encuentran a nivel de piso; además de identificarse falta de impermeabilizante en las paredes del clarificador.

Resultado de la clarificación se generan lodos de los sistemas WL-100 A/B, los cuales se purgan a piso, en la zona periférica a los tanques de almacenamiento de agua clarificada, ocasionando acumulación de lodos, generación de flora, y obstrucción en líneas, lo cual impide el seguimiento de las líneas para determinar su estado general.

Los hallazgos encontrados son de gran magnitud que el realizar una rehabilitación no es suficiente pues la mayor parte del sistema requiere de cambios de equipo y la instalación de nuevos equipos. Por lo que se opta por la instalación de un nuevo equipo que cumpla con ciertos requerimientos en el proceso para cumplir con el objetivo del sistema de clarificación.

## 5.2 Evaluación Matricial

El estudio se fundamentó en la información técnica de bibliografía de los proveedores de dos tecnologías de clarificación mismas que se describen anteriormente. De acuerdo al criterio aplicado a las tecnologías y el resultado que arrojó, el estudio se enfoca en dos nuevas tecnologías, el sistema de Decantación Lastrada y el sistema de Coagulación - Floculación Optimizada. A continuación se presentan los aspectos que fueron evaluados en el presente trabajo.

### 5.2.1 Aspectos técnicos de proceso

En la Tabla 21 se presenta el resultado de la evaluación de los subaspectos de los aspectos técnicos de proceso, en donde se presenta el peso que asigna a cada factor y subaspecto.

**Tabla 21.** Peso y calificación para los aspectos técnicos de proceso para cada tecnología.

ASPECTOS, SUBASPECTOS Y FACTORES	Desglose de atributos	Decantación Lastrada	Coagulación-Floculación Optimizada
	Peso (%)		
<b>a. Concordancia del proceso con las bases de diseño</b>	<b>20</b>		
Capacidad requerida	20	5	5
Velocidad de sedimentación	30	5	3
Calidad del agua tratada	30	5	5
Condiciones de límite de batería	20	3	5
<b>Subtotal</b>	<b>100</b>		
<b>b. Características relevantes del proceso</b>	<b>20</b>		
Condiciones de operación	30	5	5
Pre o post tratamiento necesario	40	3	5
Equipos adicionales	30	3	5
<b>Subtotal</b>	<b>100</b>		
<b>c. Características específicas de la tecnología</b>	<b>20</b>		
Área requerida total y número de módulos	40	5	3
Vida útil	30	3	5
Sistemas de seguridad de operación	30	3	5
<b>Subtotal</b>	<b>100</b>		
<b>d. Flexibilidad del proceso</b>	<b>20</b>		
	100	5	3
<b>Subtotal</b>	<b>100</b>		
<b>e. Impacto Ambiental</b>	<b>20</b>		
Residuos generados	60	5	1
Producción de ruido	40	3	5
<b>Subtotal</b>	<b>100</b>		
<b>Total</b>	<b>100</b>		

Los aspectos técnicos son de suma importancia al calificar un equipo nuevo, se debe establecer que es lo que se necesita y con que se cuenta para la instalación.

Como primer subaspecto se califica la concordancia del proceso de clarificación con los factores requeridos, a continuación se presenta la Tabla 22 para calificar este subaspecto.

**Tabla 22.** Concordancia del proceso con las bases de diseño.

<b>Factor</b>	<b>Decantación Lastrada</b>	<b>Coagulación – Floculación Optimizada</b>
<b>Capacidad</b>	8,000 GPM	8,000 GPM
<b>Velocidad de sedimentación</b>	40 – 200 m/h	30 – 120 m/h
<b>Calidad de agua tratada</b>	<1 NTU	<1-NTU
<b>Condiciones de límite de batería</b>	No se cuenta con tanque para el agua recuperada del proceso.	El sistema cuenta con todos los equipos necesarios para llevar a cabo el proceso de clarificación.

Las tecnologías que son evaluadas no requieren ciertos parámetros para llevar a cabo la operación, por lo que ambas tecnologías reciben la máxima calificación. En la decantación lastrada se requiere de un ciclón para la recuperación de la microarena y así evitar un consumo excesivo del producto, esto produce un consumo mayor en el mantenimiento del equipo, por lo que recibe una calificación de 3 en el factor pre o post tratamiento necesario y el sistema de coagulación – floculación optimizada no requiere de un tratamiento necesario por lo que recibe una calificación de 5.

El sistema de Decantación Lastrada requiere de un tanque para el almacenamiento de agua recuperada por lo que recibe como calificación 3 en el factor equipos adicionales y el sistema de Coagulación – Floculación Optimizada recibe una calificación de 5.

Las características específicas de la tecnología se presentan en la Tabla 23 para la evaluación de cada tecnología.

**Tabla 23.** Características específicas de las tecnologías.

Factor	Decantación Lastrada	Coagulación – Floculación Optimizada
<b>Área requerida total y número de módulos</b>	603 m <sup>2</sup>	1084 m <sup>2</sup>
<b>Vida útil</b>	*	*
<b>Sistema de seguridad de operación</b>	El uso de microarena en el sistema requiere que el equipo de bombeo sea con revestimiento de goma y un hidrociclón.	El sistema no requiere de un sistema de bombeo especial.

\*De acuerdo al listado de los equipos mecánicos presentado en el Anexo 2 se califica con mayor puntuación el sistema que tenga menos equipos mecánicos.

Para calificar la flexibilidad del proceso se analiza el rango de velocidad de sedimentación presentado en la Tabla 22. Es importante cuidar que no haya un impacto ambiental mayor, los residuos generados por cada sistema su cálculo se basa en el uso de químicos, mientras mayor sea el uso, se tiene una mayor producción de lodos a tratar, por lo que el sistema de Coagulación – Floculación Optimizada tiene baja calificación, ver Anexo 2. En cuanto la producción de ruido el sistema de Decantación Lastrada tiene menor puntuación por el uso del equipo para la recuperación de la microarena.



### 5.2.2 Aspectos Técnicos Complementarios

En este aspecto se califica la experiencia del licenciador, en el Anexo IV se presenta un listado de plantas instaladas por cada tecnología. Para calificar la información técnica se realizó una búsqueda de esta información, se califica la disponibilidad de la información y que tan concentrada es la información que se presenta. Para realizar una evaluación en el subaspecto de certificación del sistema para el aseguramiento de calidad, se revisa si el proveedor cuenta con dichos Certificados y también se puede calificar por medio de la experiencia del licenciador.

En la Tabla 24 se presenta la calificación que se otorga a las tecnologías evaluadas y el peso a cada subaspecto a evaluar. Basado en el Anexo IV se encontró que la Decantación Lastrada tiene instaladas 11 plantas y para Coagulación – Floculación Optimizada se tienen 6 plantas instaladas, por lo que la calificación para la Decantación Lastrada es de 5 y para la Coagulación – Floculación Optimizada es de 3.

**Tabla 24.** Resultados de la evaluación de los aspectos técnicos complementarios

ASPECTOS, SUBASPECTOS Y FACTORES	Desglose de atributos	Decantación Lastrada	Coagulación-Floculación Optimizada
	Peso (%)	Calificación	Calificación
a. Experiencia del licenciador	35	5	3
b. Información técnica	30	5	3
c. Certificación del sistema para el aseguramiento de calidad	35	5	5
<b>Total</b>	<b>100</b>		

La información técnica fue evaluada comparando la información de cada empresa, donde se presenta una breve información sobre el proceso, la eficiencia del proceso, las aplicaciones del equipo, las principales ventajas, y referencias de Plantas instaladas.

La información que presenta la Decantación Lastrada cuenta con la información necesaria para realizar la evaluación, cuenta con más de dos folletos acerca de la tecnología, en cuanto a la Coagulación – Floculación Optimizada cuenta con poca información sobre dicha tecnología, no presenta una eficiencia de remoción, no presenta datos para realizar la evaluación por lo que se tuvo que realizar una búsqueda de artículos donde se estudió la tecnología. Por lo tanto, la calificación para la Decantación Lastrada es de 5 y para la Coagulación - Floculación Optimizada es de 3. Ambas tecnologías cuentan con los certificados correspondientes para la instalación de las tecnologías, por lo que ambas obtienen una calificación de 5.

Los subaspectos que tienen mayor peso son: Experiencia del licenciador y la certificación del sistema para el aseguramiento de calidad. Es importante puesto que se debe tener evidencia de la experiencia

### 5.2.3 Aspectos económicos

Este aspecto tiene un mayor peso en la evaluación puesto que es conveniente que la tecnología tenga sustentabilidad económica. Para realizar la evaluación se obtuvieron costos estimados de inversión, costos de operación y mantenimiento y un análisis económico, donde se revisan los parámetros de rentabilidad, así como el valor presente de costos y costo anual equivalente. De acuerdo a los fundamentos económicos, el proyecto debe ser evaluado con los parámetros de rentabilidad mencionados en el apartado 2.2.1.3 Indicadores de Costo Mínimo, puesto que el proyecto genera los mismo beneficios en cuanto calidad de agua. Los datos se presentan en el Anexo II y III.

En la Tabla 25 se presentan los factores evaluados.

**Tabla 25.** Resultados de la evaluación de los Aspectos Económicos

ASPECTOS, SUBASPECTOS Y FACTORES	Desglose de atributos	Decantación Lastrada	Coagulación-Floculación Optimizada
	Peso (%)	Calificación	Calificación
<b>a. Inversión</b>	10		
	100	3	5
<b>Subtotal</b>	100		
<b>b. Requerimientos de servicios auxiliares</b>	40		
Energía Eléctrica	30	3	5
Reactivos químicos	40	5	3
Mantenimiento	30	3	5
<b>Subtotal</b>	100		
<b>c. Parámetros de rentabilidad del proyecto</b>	25		
Valor presente de costos	50	5	3
Costo anual equivalente	50	5	3
<b>Subtotal</b>	100		
<b>d. Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto</b>	25		
Inversión	30	5	5
Insumos	40	3	3
Operación y mantenimiento	30	5	5
<b>Subtotal</b>	100		
<b>Total</b>	100		

Como primer subaspecto se presenta la inversión de acuerdo a los resultados obtenidos de cotizaciones para cada tecnología y de menor costo de inversión es

Coagulación – Floculación Optimizada por lo que recibe una calificación de 5 y la inversión de la Decantación Lastrada comparada es mayor por lo que recibe calificación de 3.

El segundo subaspecto, Requerimientos de servicios auxiliares, se desglosa en tres factores: Energía eléctrica, reactivos químicos y mantenimiento. Para evaluar el primer factor se realizó un listado de los equipos que consumen energía eléctrica en la operación del sistema, el sistema de Decantación Lastrada presenta un consumo de energía de 4938.96 Kw-h/día y Coagulación – Floculación un consumo de 4657.2 Kw-h/día. Por lo que la calificación de 5 es para Coagulación – Floculación Optimizada y calificación de 3 para la Decantación Lastrada.

Para el segundo factor se realizó un listado de los químicos que utiliza cada tecnología y el consumo de cada uno de ellos para la operación. La decantación Lastrada además de utilizar sulfato de aluminio como coagulante y polielectrólito como floculante, utiliza como aditamento microarena; la cual se utiliza como ayudante de floculación para al crecimiento del flóculo, el cual es lastrado por el grano de la microarena y es más pesado para decantar con mayor rapidez.

La Coagulación – Floculación Optimizada sólo utiliza sulfato de aluminio como coagulante y polielectrólito como floculante. Se realizó un cálculo de adición de cada uno de los químicos en cada sistema. De acuerdo a los resultados se observa que pese a que la Coagulación – Floculación Optimizada utiliza solo dos químicos, se tiene un mayor consumo de polielectrólito para poder obtener la calidad de agua deseada. Por lo que en este factor obtiene una calificación de 3 y para la Decantación Lastrada es de 5.

Para el factor de mantenimiento, la Decantación Lastrada tiene un mayor costo debido a que el sistema utiliza microarena, el desgaste del equipo mecánico es mayor, se requiere de un recubrimiento de goma para las bombas de recirculación y el hidrociclón. Por lo que este sistema obtiene una calificación de 3 y para la Coagulación – Floculación Optimizada es de 5.

De acuerdo a los parámetros de rentabilidad del proyecto se observa que el sistema de Decantación Lastrada tiene menor costo anual equivalente y menor valor presente de los costos en comparación con el sistema de Coagulación – Floculación Optimizada.

La sensibilidad de la rentabilidad del proyecto es muy similar para cada sistema, de acuerdo al análisis, los dos sistemas tiene una mayor sensibilidad en el aspecto de los insumos, la variación del CAE al realizar cambios en los aspectos de inversión, operación y mantenimiento es mínima. Por lo que cada sistema obtiene una calificación de 5 y en el factor de insumos es de 3.

#### 5.2.4 Matriz con los Resultados de la evaluación

Para obtener la puntuación de cada factor se utiliza la siguiente ecuación:

$$(Calificación\ Total\ de\ Tecnología)_i = \sum_{k=1}^{nA} Pk \left( \sum_{j=1}^{nSAk} \left( Wj \sum_{i=1}^{nFj} wiCi \right) \right)$$

Donde:

Pk: Porcentaje del aspecto k.

nA: Número de aspectos considerados.

nSAk: Números de subaspectos considerados para casa aspecto k.

nFj: Número de factores considerados para cada subaspecto j.

Wj: Fracción del subaspecto j.

wi: Fracción del factor i.

Ci: Calificación del factor i.

En la Tabla 26 se presenta la matriz con el puntaje calculado para cada uno de los factores para ambas tecnologías.

**Tabla 26.** Matriz de evaluación final de las Tecnologías para el Pretratamiento de agua cruda.

ASPECTOS, SUBASPECTOS Y FACTORES	Puntaje Max	Decantación Lastrada	Coagulación-Floculación Optimizada
<b>ASPECTOS TÉCNICOS DE PROCESO</b>			
<b>a. Concordancia del proceso con las bases de diseño</b>	<b>70</b>	<b>64</b>	<b>62</b>
Capacidad requerida	14	14	14
Velocidad de sedimentación	21	21	13
Calidad del agua tratada	21	21	21
Condiciones de límite de batería	14	8	14
<b>b. Características relevantes del proceso</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>70</b>
Condiciones de operación	21	21	21
Pre o post tratamiento necesario	28	17	28
Equipos adicionales	21	13	21
<b>c. Características específicas de la tecnología</b>	<b>70</b>	<b>53</b>	<b>59</b>
Área requerida total y número de módulos	28.0	28	17
Vida útil	21.0	13	21
Sistemas de seguridad de operación	21.0	13	21
<b>d. Flexibilidad del proceso</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	<b>42</b>
<b>e. Impacto Ambiental</b>	<b>70</b>	<b>59</b>	<b>36</b>
Residuos generados	42	42	8
Producción de ruido	28	17	28
<b>Subtotal</b>	<b>350</b>	<b>297</b>	<b>269</b>
<b>ASPECTOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS</b>			
<b>a. Experiencia del licenciador</b>	<b>88</b>	<b>88</b>	<b>53</b>
<b>b. Información técnica</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>45</b>
<b>c. Certificación del sistema para el aseguramiento de calidad</b>	<b>88</b>	<b>88</b>	<b>88</b>
<b>Subtotal</b>	<b>250</b>	<b>250</b>	<b>185</b>
<b>ASPECTOS ECONÓMICOS</b>			
<b>a. Inversión</b>	<b>40</b>	<b>24</b>	<b>40</b>
<b>b. Requerimientos de servicios auxiliares</b>	<b>160</b>	<b>122</b>	<b>134</b>
Energía Eléctrica	48	29	48
Reactivos químicos	64	64	38
Mantenimiento	48	29	48
<b>c. Parámetros de rentabilidad del proyecto</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>60</b>
Valor presente de costos	50	50	30
Costo anual equivalente	50	50	30
<b>d. Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto</b>	<b>100</b>	<b>84</b>	<b>84</b>
Inversión	30	30	30
Insumos	40	24	24
Operación y mantenimiento	30	30	30
<b>Subtotal</b>	<b>400</b>	<b>330</b>	<b>318</b>
<b>Total</b>	<b>1,000</b>	<b>876</b>	<b>772</b>

## **6. Discusión de Resultados**

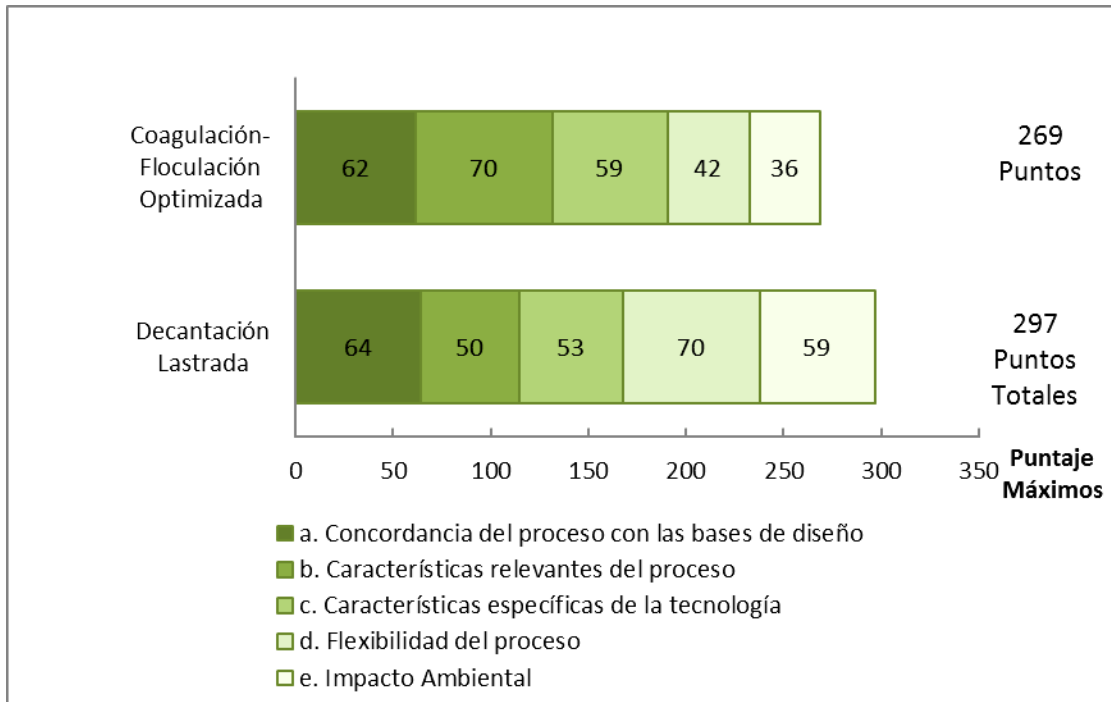
Conforme a la calificación que se otorgó a cada tecnología en los aspectos, subaspectos y factores de esta evaluación se obtuvo un puntaje con base a 1000 puntos como máximo para toda la evaluación. A continuación se presentan los puntos otorgados a cada uno de los subaspectos de los tres aspectos evaluados.

### **6.1 Aspectos técnicos del proceso**

En la Figura 13 se muestra el puntaje que recibe cada tecnología por subaspecto. Como se puede observar la Decantación Lastrada obtiene un puntaje total de 297, esto se debe a que cumple con los requisitos del caso de estudio, además de tener una ventaja considerable en la flexibilidad del proceso y en el impacto ambiental; es una tecnología que con ayuda de la recuperación de la microarena, el consumo en reactivos es menor a la Coagulación – Floculación Optimizada, por ende la generación de residuos sólidos es mínima. En cuanto a flexibilidad operativa es de suma importancia que el rango de la velocidad de sedimentación sea amplio para poder manejar diferentes calidades de agua.

En cuanto a la Coagulación – Floculación Optimizada obtiene un puntaje total de 269. Esta tecnología tiene una ventaja en las características relevantes del proceso, puesto que no requiere de un sistema para la recuperación de reactivos, lo que evita un mayor consumo en energía eléctrica, además de que la vida útil de los equipos es mayor, ya que no hay un desgaste considerable en equipos mecánicos.

En cuanto a la Concordancia del proceso con las bases de diseño, ambas tecnologías cumplen, con una pequeña excepción, la Decantación Lastrada requiere de un tanque para la recuperación de agua proveniente del filtro prensa, el agua del lavado de los filtros de disco, espesador de lodos y la recirculación para la recuperación de la microarena.



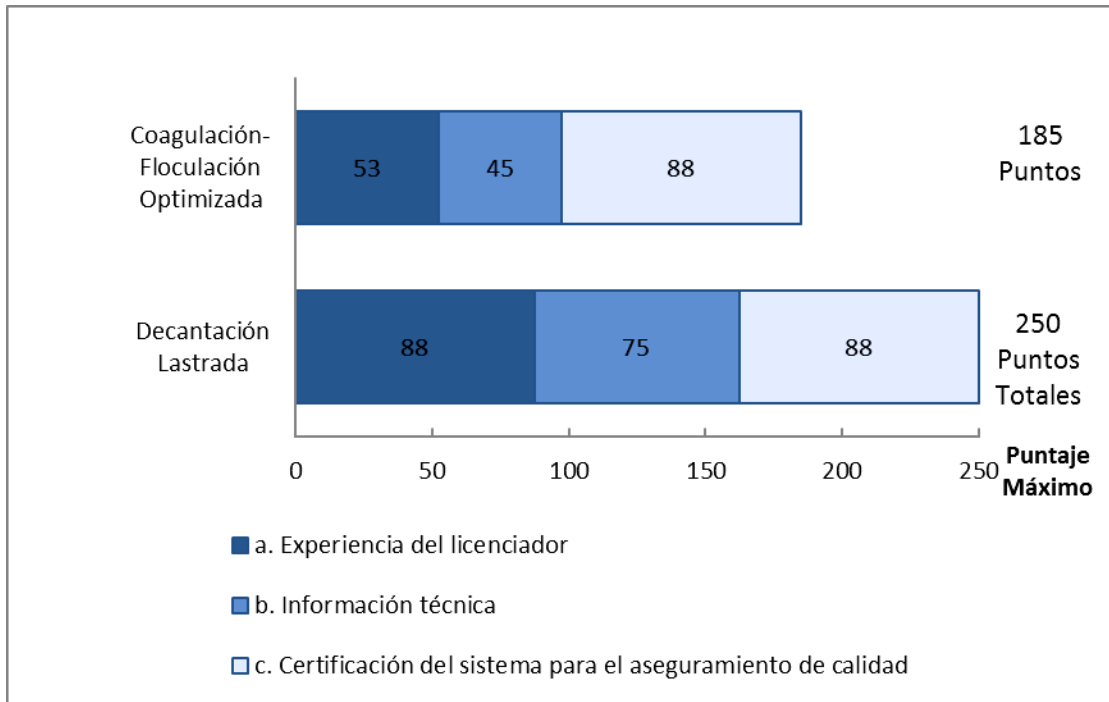
**Figura 13.** Comparación del Puntaje relacionado con los subaspectos del Aspecto técnico del proceso para cada tecnología evaluada.

## 6.2 Aspectos técnicos complementarios

En la Figura 14 se muestra que la tecnología Decantación Lastrada cumple con todos los subaspectos, obteniendo 250 puntos totales. Debido a la experiencia en la instalación y operación del sistema del pretratamiento que proponen, tener la información técnica disponible para realizar un análisis profundo en su operación y tener la certificación correspondiente para asegurar la calidad del sistema que se utiliza.

El sistema de Coagulación – Floculación Optimizada cuenta con un menor número de plantas instaladas por lo que recibe una puntuación de 53 en cuanto experiencia. La información técnica que presenta es poco eficiente para realizar un análisis adecuado del proceso, por lo que recibe una puntuación de 45. Sin embargo cuenta con la Certificación para asegurar la calidad del sistema. En consecuencia el sistema tiene un puntaje total de 185.





**Figura 14.** Comparación del Puntaje relacionado con los subaspectos del Aspecto técnico complementario para cada tecnología evaluada.

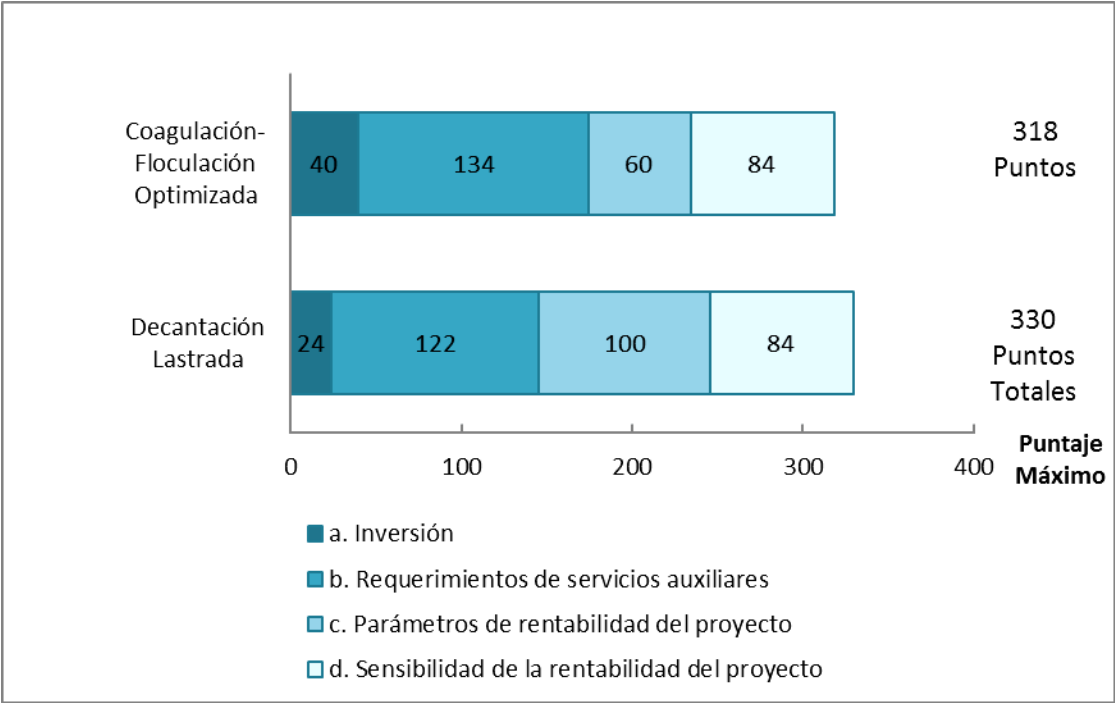
### 6.3 Aspectos económicos

En la Figura 15 se presenta el puntaje obtenido por ambas tecnologías en cuanto al aspecto económico. Como se observa para el primer subaspecto la Coagulación – Floculación Optimizada obtiene 40 puntos, puesto que la inversión para este equipo es menor en comparación a la Decantación Lastrada que recibe 24 puntos.

En el subaspecto de Requerimiento de servicios auxiliares la diferencia de puntos es de 12 puntos. La Decantación Lastrada gana un mayor puntaje por un bajo consumo de reactivos a lado de la Coagulación – Floculación Optimizada. En cuanto a consumo de energía y mantenimiento el mayor costo es para la Decantación Lastrada.

El sistema de Decantación Lastrada es más rentable comparado con la Coagulación – Floculación Optimizada por lo que obtiene un puntaje de 100 y la Coagulación – Floculación Optimizada de 60 puntos. De acuerdo al estudio

económico la sensibilidad de la rentabilidad en cada sistema es la misma, por lo que ambas tecnologías reciben 84 puntos. Los puntos totales para a Decantación Lastrada es de 290 puntos y para la Coagulación – Floculación Optimizada es de 358 puntos.



**Figura 15.** Comparación del Puntaje relacionado con los subaspectos del aspecto económico para cada tecnología evaluada.

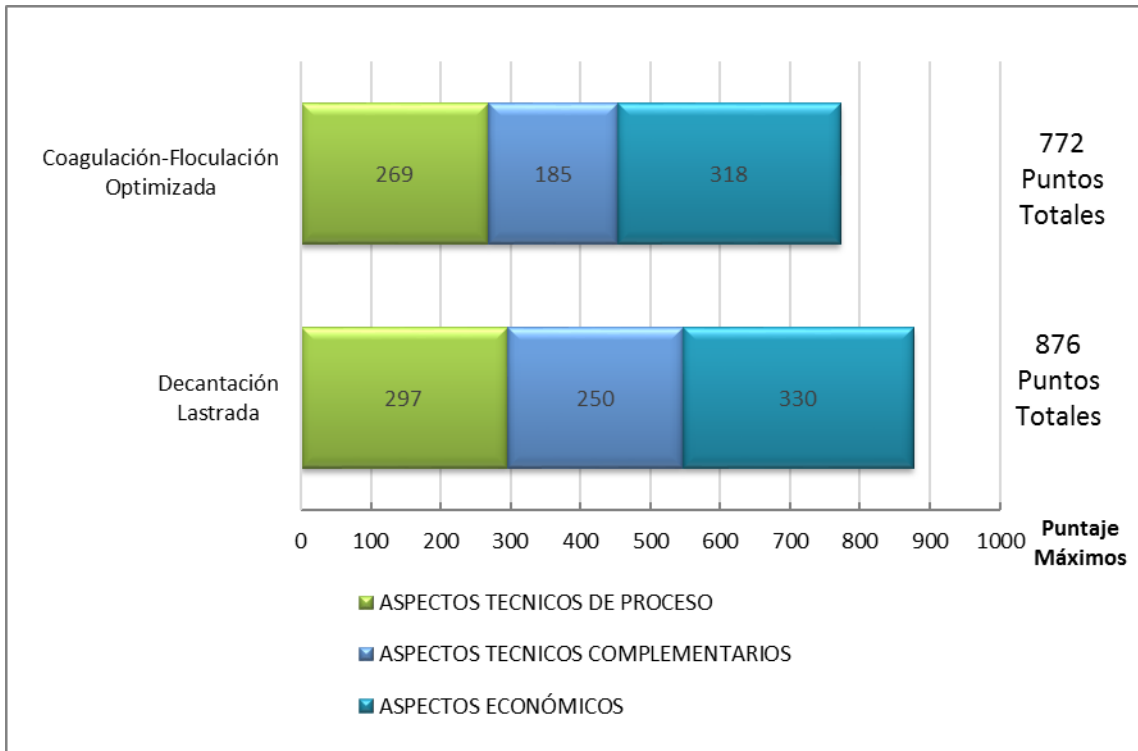
## 6.4 Evaluación Total

En la Figura 16 se presenta el puntaje total que obtuvo cada una de las tecnologías evaluadas en los tres aspectos evaluados, como se puede observar el sistema de Decantación Lastrada tiene mayor puntaje en cada uno de los aspectos evaluados.

Considerando que este sistema tiene mayor experiencia en la instalación y operación de la tecnología que proponen. Además de obtener un bajo consumo de químicos, lo que genera menos residuos sólidos para poder ser tratados. Esta tecnología además cuenta con un menor espacio de instalación, dejando más espacio para el manejo de la tecnología. El sistema cuenta con un mayor rango de velocidad de sedimentación, lo que permite que la entrada de la calidad de agua sea variable obteniendo una flexibilidad operativa.

En cuanto al aspecto económico, la tecnología de Decantación Lastrada presenta mayor rentabilidad en comparación con la Coagulación – Floculación Optimizada. En el resultado del análisis de sensibilidad en ambos sistemas se obtiene que el parámetro más sensible es insumos, que presenta un cambio considerable en el costo anual equivalente. Al realizar una variación en los parámetros de sensibilidad y operación y mantenimiento, el cambio en el costo anual equivalente es mínimo.

Al final de la evaluación se tiene como resultado que la Coagulación – Floculación Optimizada obtiene un puntaje de 772 y la Decantación Lastada obtiene un puntaje de 876. Por lo que el resultado final nos dirige a que la mejor opción para el caso de estudio es la Decantación Lastrada.



**Figura 16.** Gráfica de la evaluación final de ambas tecnologías.

## 7. Conclusiones

En el presente trabajo se enfocó en la problemática que presenta un sistema de pretratamiento de agua de una Refinería. Actualmente, el sistema suministra agua clarificada de baja calidad alcanzando un nivel de turbidez de 8 NTU, lo que ocasiona problemas en la operación del sistema de desmineralización. Con la inspección física realizada al sistema, se encontró que el equipo de clarificación se encuentra en mal estado y muy difícilmente de restaurar. Por lo que se opta por la instalación de un equipo de última tecnología, para esto se realizó un estudio de las opciones para este caso en particular y una evaluación matricial y poder elegir la mejor opción.

En el estudio se encontró con dos tecnologías viables para realizar una propuesta conceptual para dicho caso de estudio, la Decantación Lastrada y la Coagulación – Floculación Optimizada. Ambas tecnologías con el principio de coagulación – floculación. Para elegir la mejor opción para dar solución a la problemática actual, se realizó una evaluación matricial donde se calificaron tres aspectos de suma importancia: aspecto técnico de proceso, aspecto técnico complementario y aspecto económico.

Al final de la evaluación se obtuvo como resultado que la mejor opción es la Decantación Lastada, la tecnología recibió en cada uno de los aspectos el mayor puntaje. Esta tecnología cuenta con un sistema de recuperación de microarena, la cual es parte fundamental de la tecnología, ya que ayuda a la acumulación de los flóculos formados en la coagulación para una sedimentación rápida, lo que tiene por consecuencia que el tamaño del equipo sea menor.

Con este sistema se tiene otras ventajas, como la disminución en el consumo de químicos, esto implica que la generación de lodos es menor y con ello el impacto ambiental. El utilizar este aditamento se tiene como consecuencia un mayor gasto de energía eléctrica y mantenimiento, debido al desgaste del equipo mecánico. Sin embargo, la rentabilidad del proyecto no se ve afectada, puesto que el consumo de estos parámetros no son mucho mayores a los que presenta la tecnología de

Coagulación – Floculación Optimizada. El bajo consumo de químicos en el proceso ayuda para que el proyecto sea rentable.

Las dos tecnologías son relativamente nuevas, sin embargo, la Decantación Lastrada tiene un historial con más plantas instaladas con este sistema en comparación a la Coagulación – Floculación Optimizada.

De acuerdo al análisis de sensibilidad que se realizó para el parámetro de rentabilidad Costo Anual Equivalente (CAE), se obtuvo que los insumos presentan mayor sensibilidad en las dos tecnologías. En cuanto a la inversión, operación y mantenimiento no presenta un cambio importante en el Costo Anual Equivalente.

## 8. Bibliografía

- Aguilar, M. I. (2002). *Tratamiento físico - químico de aguas residuales: coagulación – floculación*. (Ilustrada ed.). España: EDITUM.
- Baca, G. (2007). *Fundamentos de ingeniería económica*. México: McGraw-Hill.
- Charfuelan, L. C. (2012). *Remoción de melanoidinas sintéticas mediante electrocoagulación*. Santiago de Cali: Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería.
- Ciceri, H. N. (2009). *Decisiones de inversión en Plantas Químicas Modelos y criterios*. México: Facultad de Química, UNAM.
- Degrémont. (1979). *Manual Técnico del Agua*. España: Degrémont.
- DPN. (27 de Noviembre de 2012). *Módulo de Gestión de la Inversión Pública*. Obtenido de Gestión de la Inversión Pública.: <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/eLearning/dnp/2/swf/indicadores-evaluacion.swf>
- Malvern. (24 de Septiembre de 2013). *Malvern*. Obtenido de Zeta potential measurement using laser Doppler electrophoresis (LDE): [http://www.malvern.com/LabEng/technology/zeta\\_potential/zeta\\_potential\\_LDE.htm](http://www.malvern.com/LabEng/technology/zeta_potential/zeta_potential_LDE.htm)
- Mansouri, K. E. (2011). Application of electrochemically dissolved iron in the removal of tannic acid from water. *Chemical Engineering Journal* 172, 970-976.
- Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación*. Ciudad Real, España: Tesis de doctorado, Facultad de ciencias químicas.
- Montaña, F. (2010). *Selección de Tecnología para la Recolección y Transporte de Aguas Lluvias y Aguas Residuales en Áreas Urbanas*. Santiago de Cali: Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.
- Moreno, O. y. (1998). *Evaluación de tecnologías en la industria de refinación del petróleo*. México: Instituto Mexicano del Petróleo-PEMEX REFINACIÓN.
- Reynolds, T. D. (1982). *Unit operations and processes in environmental engineering*. Massachusetts, USA: PWS-KENT Publishing Company.

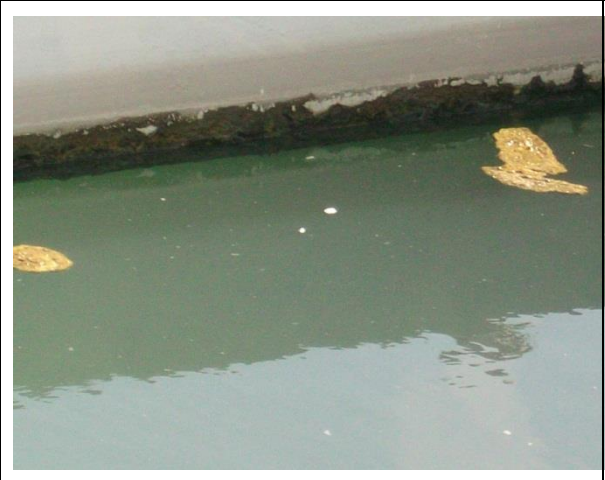

Rigola, M. (1990). *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*. Barcelona, España: Alfaomega.

Rojas, S. M. (2007). *Implementación de una unidad piloto de floculación lastrada para evaluar su comportamiento en el tratamiento de aguas residuales domésticas*. Bogotá, Colombia: Tesis de Maestría Facultad de Ingeniería Ambiental y Sanitaria.







## 9. ANEXOS

### Anexo I. Fotografías del Sistema de Pretratamiento de agua cruda de una Refinería

 A wide-angle photograph showing the surface of a large rectangular clarifier tank. The water is a murky, greenish-brown color. There are some dark, irregular patches on the surface, possibly debris or algae. The background shows a hazy sky and some distant structures.	 A close-up photograph of the corner of a clarifier tank. The water is a bright green color. The concrete walls are visible, and there is some dark material (possibly sludge or debris) accumulated in the corner.
<p><b>Figura 17.</b> Clarificador WL-100 B, vista en superficie.</p>	<p><b>Figura 18.</b> Clarificador WL-100 B, vista en superficie.</p>
 A panoramic view from inside a clarifier tank. The water is a dark green color. In the foreground, there is a large, cylindrical metal structure (the cono) supported by a metal frame. A ladder is visible in the background.	 A close-up view of the central part of a clarifier tank. The water is dark green. The structure of the reaction chamber is visible, showing a large, cylindrical metal pipe or structure.
<p><b>Figura 19.</b> Clarificador WL-100 A, vista panorámica desde dentro del Equipo. Rastras y Cono.</p>	<p><b>Figura 20.</b> Clarificador WL-100 A, vista en cuerpo central. Estructura de la cámara de reacción.</p>

Las fotografías son de la parte de superior del clarificador que se encuentra operando, en estas se presentan sólidos suspendidos y oxidación en los canales de recuperación del agua clarificada.

Las fotografías que se encuentran abajo son del clarificador en mantenimiento, presentando oxidación en las rastras, el cono y la cámara de reacción.

	
<p><b>Figura 21.</b> Entrada este del área de Pretratamiento.</p>	<p><b>Figura 22.</b> Lado oeste del TV-100 (almacenamiento de agua clarificada).</p>
	
<p><b>Figura 23.</b> Lado este del tanque de almacenamiento de agua clarificada.</p>	<p><b>Figura 24.</b> Lado sur del Filtro (actualmente fuera de operación).</p>

Las fotografías presentan una acumulación de lodos secos que se fueron almacenando debido a la falta de un sistema de tratamiento y/o disposición de lodos.

## Anexo II. Costos de operación y mantenimiento

### COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO Coagulación-Floculación Optimizada

A continuación se presenta un listado de los equipos mecánicos del sistema de clarificación, el consumo y costo de Energía.

**Tabla 27.** Lista de equipos mecánicos con el consumo de energía eléctrica del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.

CONCEPTO	UNIDADES EN OPERACIÓN (40 ppm)	CAPACIDAD Kw	TIEMPO DE OPERACIÓN (h/día)	CONSUMO DE POTENCIA Kw-h/día	COSTO USD /Kw-h	COSTO USD/DÍA
Accionamiento central (Tornamesa)	1	0.55	24	13.2	\$ 0.08	\$ 1.06
Mezclador rápido	2	4	24	192	\$ 0.08	\$ 15.36
Agitador Floculador	1	4	24	96	\$ 0.08	\$ 7.68
Bombas de extracción de lodo primario	2	11.8	24	566.4	\$ 0.08	\$ 45.31
Bombas de recirculación de lodo primario	2	11.8	24	566.4	\$ 0.08	\$ 45.31
Bombas limpieza de discos (1x3Filtros)	1	1.8	12	21.6	\$ 0.08	\$ 1.73
Bombas extracción de lodos (2x1Filtro)	6	1.8	12	129.6	\$ 0.08	\$ 10.37
Bomba recirculación agua recuperada	1	11.8	24	283.2	\$ 0.08	\$ 22.66
Agitador tanque recuperación agua	1	4	24	96	\$ 0.08	\$ 7.68
Bombas dosificadoras polímero lodos	2	11.8	24	566.4	\$ 0.08	\$ 45.31
Agitador de tanque mezcla de lodos	1	4	24	96	\$ 0.08	\$ 7.68
Bombas dosificadoras sulfato de aluminio	2	11.8	24	566.4	\$ 0.08	\$ 45.31
Bombas dosificadoras de polímero	2	11.8	24	566.4	\$ 0.08	\$ 45.31
Filtro banda	1	4	12	48	\$ 0.08	\$ 3.84
Bombas lavado de telas	2	11.8	12	283.2	\$ 0.08	\$ 22.66
Bombas alimentación deshidratado de lodos	2	11.8	24	566.4	\$ 0.08	\$ 45.31
					<b>TOTAL (USD/DÍA)</b>	<b>\$372.58</b>
					<b>TOTAL (USD/MES)</b>	<b>\$11,177.28</b>
					<b>TOTAL (USD/AÑO)</b>	<b>\$134,127.36</b>

Consumo de energía para operación de la planta 4657.2 Kw-h/día.

## Reactivos y Consumibles

**Tabla 28.** Consumo de reactivos del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.

CONCEPTO	CANTIDAD	CONSUMO Kg/día	PRECIO UNITARIO USD/Kg	COSTO USD/DÍA
Polielectrólito (mg/L)	2	86.4	\$7.30	\$630.72
Sulfato de aluminio comercial (mg/L)	25	1080	\$0.30	\$324.00
Polímero para lodos (mg/L)	0.5	21.6	\$7.30	\$157.68

**TOTAL (USD/DÍA) \$ 1,112.40**

**TOTAL (USD/MES) \$ 33,372.00**

**TOTAL (USD/AÑO) \$ 400,464.00**

## Mantenimiento Preventivo

**Tabla 29.** Costos del mantenimiento del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.

CONCEPTO	PERIODO	COSTO UNITARIO USD/FRECC.	COSTO USD/MES
Mantenimiento preventivo	1 vez/año	\$ 40,000.00	\$ 10,122.68
Análisis	1 vez/semana	\$ 244.44	\$ 977.78
Refacciones	1 vez/2 año	\$ 31,158.00	\$ 1,298.25

**TOTAL (USD/MES) \$ 12,398.71**

**TOTAL (USD/DÍA) \$ 413.29**

**TOTAL (USD/AÑO) \$ 148,784.52**

## Operación

**Tabla 30.** Costos de operación del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.

CONCEPTO	NÚMERO	SALARIO (USD/MES)	F.S.R	USD/MES
Ayudante	4	\$ 400.00	1.85	\$ 2,960.00
Operación	1	\$ 1,000.00	1.85	\$ 1,850.00

**TOTAL (USD/DÍA) \$ 160.33**

**TOTAL (USD/MES) \$ 4,810.00**

**TOTAL (USD/AÑO) \$ 57,720.00**

## Resumen de Costos

**Tabla 31.** Resumen de costos del sistema de Coagulación-Floculación Optimizada.

CONCEPTO	USD/DIA	USD/MES	USD/AÑO	USD/m <sup>3</sup>
Energía eléctrica	\$ 372.58	\$ 11,177.28	\$ 134,127.36	\$ 0.01
Reactivos	\$ 1,112.40	\$ 33,372.00	\$ 400,464.00	\$ 0.03
Mantenimiento preventivo	\$ 413.29	\$ 12,398.71	\$ 148,784.52	\$ 0.01
Operación	\$ 160.33	\$ 4,810.00	\$ 57,720.00	\$ 0.00
Gran total	\$ 2,058.60	\$ 61,757.99	\$ 741,095.88	\$ 0.05

**Volumen de agua purificada (m<sup>3</sup>/día) 43200**

**Costo de agua tratada (USD/m<sup>3</sup>) \$0.05**

**Costo de agua tratada (Pesos/m<sup>3</sup>) \$0.62**

## COSTOS DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO Decantación Lastrada

### Energía Eléctrica

**Tabla 32.** Lista de equipos mecánicos con el consumo de energía eléctrica del sistema de Decantación Lastrada.

CONCEPTO	UNIDADES EN OPERACIÓN	CAPACIDAD Kw	TIEMPO DE OPERACIÓN (h/día)	CONSUMO DE POTENCIA Kw-h/día	COSTO USD /Kw-h	COSTO USD/DÍA
Mezclador tanque de coagulación	2	11.18	24	536.64	\$ 0.08	\$ 42.93
Mezclador tanque de inyección	2	11.18	24	536.64	\$ 0.08	\$ 42.93
Mezclador tanque de maduración	2	5.59	24	268.32	\$ 0.08	\$ 21.47
Bomba de recirculación	2	11.18	24	536.64	\$ 0.08	\$ 42.93
Hidrociclón	1	12	24	288	\$ 0.08	\$ 23.04
Motorreductor rastra mecánica	2	3.73	24	179.04	\$ 0.08	\$ 14.32
Preparación y dosificación de coagulante	1	14.91	24	357.84	\$ 0.08	\$ 28.63
Preparación y dosificación de polímero	1	11.18	24	268.32	\$ 0.08	\$ 21.47
Sistema de espesamiento de lodos	1	11.18	24	268.32	\$ 0.08	\$ 21.47
Sistema de filtro prensa	2	11.18	12	268.32	\$ 0.08	\$ 21.47
Bombas de filtro prensa	2	22.35	12	536.4	\$ 0.08	\$ 42.91
Bombas de recirculación de agua	1	14.91	24	357.84	\$ 0.08	\$ 28.63
Sistema de filtración Discfilter	2	11.18	24	536.64	\$ 0.08	\$ 42.93
<b>TOTAL (USD/DÍA)</b>						<b>\$ 395.12</b>
<b>TOTAL (USD/MES)</b>						<b>\$ 11,853.50</b>
<b>TOTAL (USD/AÑO)</b>						<b>\$ 142,242.05</b>

*Consumo de energía para operación de la planta 4938.96 Kw-h/día*

## Reactivos y Consumibles

La carga inicial de la microarena es de 2 kg por m<sup>3</sup>/h de agua a tratar.

**Tabla 33.** Consumo de reactivos del sistema de Decantación Lastrada.

CONCEPTO	CANTIDAD	CONSUMO Kg/día	PRECIO UNITARIO USD/Kg	COSTO USD/DÍA
Polímero (mg/l)	0.6	25.9	\$ 7.30	\$ 189.07
Microarena (gr/m3)	1	43.2	\$ 1.10	\$ 47.52
Sulfato de aluminio comercial (mg/l)	40	1728	\$ 0.30	\$ 518.40
Polímero para lodos (5 Kg/ton solidos secos)		22	\$ 7.30	\$ 160.60
<b>TOTAL (USD/DÍA)</b>				<b>\$ 915.59</b>
<b>TOTAL (USD/MES)</b>				<b>\$ 27,467.70</b>
<b>TOTAL (USD/AÑO)</b>				<b>\$ 329,612.40</b>

## Mantenimiento Preventivo

**Tabla 34.** Costos de mantenimiento del sistema de Decantación Lastrada.

CONCEPTO	PERIODO	COSTO UNITARIO USD/FRECC.	COSTO USD/MES
Mantenimiento preventivo	1 vez/año	\$ 40,000.00	\$ 3,333.33
Análisis	1 vez/semana	\$ 244.44	\$ 977.78
Refacciones	1 vez/año	\$ 120,000.00	\$ 10,000.00
<b>TOTAL (USD/MES)</b>			<b>\$ 14,311.11</b>
<b>TOTAL (USD/DÍA)</b>			<b>\$ 477.04</b>
<b>TOTAL (USD/AÑO)</b>			<b>\$ 171,733.32</b>

## Operación

**Tabla 35.** Costos de operación del sistema de Decantación Lastrada.

CONCEPTO	NÚMERO	SALARIO (USD/MES)	F.S.R	USD/MES
Ayudante	4	\$ 400.00	1.85	\$ 2,960.00
Operación	1	\$ 1,000.00	1.85	\$ 1,850.00
<b>TOTAL (USD/DÍA)</b>				<b>\$ 160.33</b>
<b>TOTAL (USD/MES)</b>				<b>\$ 4,810.00</b>
<b>TOTAL (USD/AÑO)</b>				<b>\$ 57,720.00</b>

## Resumen de Costos

**Tabla 36.** Resumen de costos del sistema de Decantación Lastrada.

CONCEPTO	USD/DIA	USD/MES	USD/AÑO	USD/m3
Energía eléctrica	\$ 395.12	\$ 11,853.50	\$ 142,242.05	\$ 0.01
Reactivos	\$ 915.59	\$ 27,467.70	\$ 329,612.40	\$ 0.02
Mantenimiento preventivo	\$ 477.04	\$ 14,311.11	\$ 171,733.32	\$ 0.01
Operación	\$ 160.33	\$ 4,810.00	\$ 57,720.00	\$ 0.00
Gran total	\$ 1,925.04	\$ 57,751.11	\$ 693,013.37	\$ 0.04

**Volumen de agua purificada (m<sup>3</sup>/día) 43200**

**Costo de agua tratada (USD/m<sup>3</sup>) \$0.05**

**Costo de agua tratada (Pesos/m<sup>3</sup>) \$0.59**

Los costos presentados anteriormente están en base a la siguiente tabla.

**Tabla 37.** Datos base para el cálculo de los costos de cada sistema.

TURBIDEZ	MAYOR	50	NTU
DIAS TRABAJADOS		7	DÍAS/SEMANA
		30	DÍAS/MES
VOLUMEN TOTAL DE AGUA PRODUCTO		8000	GPM



### Anexo III. Análisis económico

En la Tabla 38 se muestra el análisis económico para la tecnología de Decantación Lastrada, donde se muestran los costos variables, costos fijos, y los costos directos e indirectos en un horizonte de evaluación de 20 años.

**Tabla 38.** Análisis del horizonte de evaluación de la tecnología Decantación Lastrada

Año		2014	2015	2016	2017	2018
Horizonte de evaluación		0	1	2	3	4
% Operación		0	0%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción</b>						
<b>Materia prima</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>				
Agua cruda	\$10,343,808.00	USD/AÑO	-	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>				
Sulfato de aluminio	\$186,624.00	USD/AÑO	-	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00
Polielectrólito	\$125,881.20	USD/AÑO	-	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20
Microarena	\$17,107.20	USD/AÑO	-	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20
<b>Energéticos y otros</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>				
Energía eléctrica	\$142,242.05	USD/AÑO	-	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05
<b>Total de costos variables de producción</b>			-	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45
<b>Costos fijos del sistema</b>						
<b>Costos fijos directos</b>						
Mantenimiento preventivo		\$171,733.32	-	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32
<b>Total costos fijos directos</b>		\$171,733.32	-	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>						
<b>Costo total en efectivo de operación</b>			-	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>		\$5,096,000.00	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>		\$5,096,000.00	\$9,810,174.79	\$8,759,084.64	\$7,820,611.28	\$6,982,688.65

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Horizonte de evaluación	5	6	7	8	9
%Operación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción</b>					
<b>Materia prima</b>					
Agua cruda	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>					
Sulfato de aluminio	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00
Polielectrólito	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20
Microarena	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20
<b>Energéticos y otros</b>					
Energía eléctrica	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05
<b>Total de costos variables de producción</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>
<b>Costos fijos del sistema</b>					
<b>Costos fijos directos</b>					
Mantenimiento preventivo	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32
<b>Total costos fijos directos</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>					
<b>Costo total en efectivo de operación</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	<b>\$6,234,543.43</b>	<b>\$5,566,556.64</b>	<b>\$4,970,139.85</b>	<b>\$4,437,624.87</b>	<b>\$3,962,165.06</b>

Año	2024	2025	2026	2027	2028
Horizonte de evaluación	10	11	12	13	14
%Operación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción</b>					
<b>Materia prima</b>					
Agua cruda	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>					
Sulfato de aluminio	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00
Polielectrólito	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20
Microarena	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20
<b>Energéticos y otros</b>					
Energía eléctrica	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05
<b>Total de costos variables de producción</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>	<b>\$10,815,662.45</b>
<b>Costos fijos del sistema</b>					
<b>Costos fijos directos</b>					
Mantenimiento preventivo	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32
<b>Total costos fijos directos</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>	<b>\$171,733.32</b>
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>					
<b>Costo total en efectivo de operación</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>	<b>\$10,987,395.77</b>
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	<b>\$3,537,647.38</b>	<b>\$3,158,613.73</b>	<b>\$2,820,190.83</b>	<b>\$2,518,027.53</b>	<b>\$2,248,238.86</b>

<b>Año</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>
<b>Horizonte de evaluación</b>	15	16	17	18	19	20
<b>%Operación</b>	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	<b>Costos variables de producción</b>					
<b>Materia prima</b>						
<b>Agua cruda</b>	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>						
<b>Sulfato de aluminio</b>	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00	\$186,624.00
<b>Polielectrólito</b>	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20	\$125,881.20
<b>Microarena</b>	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20	\$17,107.20
<b>Energéticos y otros</b>						
<b>Energía eléctrica</b>	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05	\$142,242.05
<b>Total de costos variables de producción</b>	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45	\$10,815,662.45
	<b>Costos fijos del sistema</b>					
<b>Costos fijos directos</b>						
<b>Mantenimiento preventivo</b>	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32
<b>Total costos fijos directos</b>	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32	\$171,733.32
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>						
<b>Costo total en efectivo de operación</b>	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77	\$10,987,395.77
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	\$2,007,356.13	\$1,792,282.26	\$1,600,252.02	\$1,428,796.44	\$1,275,711.11	\$1,139,027.78

Para realizar el cálculo del Costo Anual Equivalente (CAE) antes se debe calcular el Valor Presente de los Costos (VPC) utilizando la ecuación (8) presentada en el los Fundamentos económicos.

$$VPC = \sum_{j=0}^n \left[ \frac{C_j}{(1+i)^j} \right] \quad (8)$$

**Tabla 39.** Valores del VPC durante el horizonte de evaluación para la Decantación Lastada

Horizonte de evaluación	Valor presente	Horizonte de evaluación	Valor presente
2014	\$5,096,000.00	2025	\$3,158,613.73
2015	\$9,810,174.79	2026	\$2,820,190.83
2016	\$8,759,084.64	2027	\$2,518,027.53
2017	\$7,820,611.28	2028	\$2,248,238.86
2018	\$6,982,688.65	2029	\$2,007,356.13
2019	\$6,234,543.43	2030	\$1,792,282.26
2020	\$5,566,556.64	2031	\$1,600,252.02
2021	\$4,970,139.85	2032	\$1,428,796.44
2022	\$4,437,624.87	2033	\$1,275,711.11
2023	\$3,962,165.06	2034	\$1,139,027.78
2024	\$3,537,647.38	VPN	\$87,165,733.27

Con los valores obtenidos del VP a lo largo del horizonte de evaluación se obtiene el CAE utilizando la ecuación (9) presentada en el los Fundamentos económicos.

$$CAE = VPC \left[ \frac{i*(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (9)$$

Se obtiene como resultado:

$$CAE = \$87,165,733.27 \left[ \frac{0.12 * (1 + 0.12)^{20}}{(1 + 0.12)^{20} - 1} \right]$$

$$CAE = \$11,669,642.03$$

En la Tabla 40 se muestra el análisis económico para la tecnología de Coagulación – Floculación Optimizada, donde se muestran los costos variables, costos fijos, y los costos directos e indirectos en un horizonte de evaluación de 20 años.

**Tabla 40.** Análisis del horizonte de evaluación de la tecnología Coagulación – Floculación Optimizada

Año		2014	2015	2016	2017	2018
Horizonte de evaluación		0	1	2	3	4
% Operación		0	0%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción</b>						
<b>Materia prima</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>				
Agua cruda	\$10,343,808.00	USD/AÑO	-	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>				
Sulfato de aluminio	\$116,640.00	USD/AÑO	-	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00
Polielectrólito	\$283,824.00	USD/AÑO	-	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00
Microarena	\$0.00	USD/AÑO	-	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Energéticos y otros</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>				
Energía eléctrica	\$134,127.36	USD/AÑO	-	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36
<b>Total de costos variables de producción</b>			-	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36
<b>Costos fijos del sistema</b>						
<b>Costos fijos directos</b>						
Mantenimiento preventivo		\$148,784.52	-	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52
<b>Total costos fijos directos</b>		\$148,784.52	-	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>						
<b>Costo total en efectivo de operación</b>			-	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>			\$4,959,484.00	-	-	-
<b>Valor presente</b>			\$4,959,484.00	\$9,845,699.89	\$8,790,803.48	\$7,848,931.67
						\$7,007,974.71

Año	2019	2020	2021	2022	2023
Horizonte de evaluación	5	6	7	8	9
%Operación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción</b>					
<b>Materia prima</b>					
Agua cruda	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>					
Sulfato de aluminio	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00
Polieléctrolito	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00
Microarena	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Energéticos y otros</b>					
Energía eléctrica	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36
<b>Total de costos variables de producción</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>
<b>Costos fijos del sistema</b>					
<b>Costos fijos directos</b>					
Mantenimiento preventivo	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52
<b>Total costos fijos directos</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>					
<b>Costo total en efectivo de operación</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	<b>\$6,257,120.28</b>	<b>\$5,586,714.53</b>	<b>\$4,988,137.98</b>	<b>\$4,453,694.62</b>	<b>\$3,976,513.05</b>

Año	2024	2025	2026	2027	2028
Horizonte de evaluación	10	11	12	13	14
%Operación	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción</b>					
<b>Materia prima</b>					
Agua cruda	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>					
Sulfato de aluminio	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00
Polieléctrolito	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00
Microarena	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Energéticos y otros</b>					
Energía eléctrica	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36
<b>Total de costos variables de producción</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>	<b>\$10,878,399.36</b>
<b>Costos fijos del sistema</b>					
<b>Costos fijos directos</b>					
Mantenimiento preventivo	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52
<b>Total costos fijos directos</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>	<b>\$148,784.52</b>
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>					
<b>Costo total en efectivo de operación</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>	<b>\$11,027,183.88</b>
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	<b>\$3,550,458.08</b>	<b>\$3,170,051.86</b>	<b>\$2,830,403.45</b>	<b>\$2,527,145.94</b>	<b>\$2,256,380.30</b>

<b>Año</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	<b>2034</b>
<b>Horizonte de evaluación</b>	15	16	17	18	19	20
<b>%Operación</b>	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	<b>Costos variables de producción</b>					
<b>Materia prima</b>						
<b>Agua cruda</b>	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00	\$10,343,808.00
<b>Consumo de químicos</b>						
<b>Sulfato de aluminio</b>	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00	\$116,640.00
<b>Polielectrólito</b>	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00	\$283,824.00
<b>Microarena</b>	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
<b>Energéticos y otros</b>						
<b>Energía eléctrica</b>	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36	\$134,127.36
<b>Total de costos variables de producción</b>	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36	\$10,878,399.36
	<b>Costos fijos del sistema</b>					
<b>Costos fijos directos</b>						
<b>Mantenimiento preventivo</b>	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52
<b>Total costos fijos directos</b>	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52	\$148,784.52
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>						
<b>Costo total en efectivo de operación</b>	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88	\$11,027,183.88
<b>Inversión total y capital de trabajo</b>	-	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	\$2,014,625.27	\$1,798,772.56	\$1,606,046.93	\$1,433,970.47	\$1,280,330.78	\$1,143,152.48

Para realizar el cálculo del Costo Anual Equivalente (CAE) antes se debe calcular el Valor Presente de los Costos (VPC) utilizando la ecuación (8) presentada en el los Fundamentos económicos.

$$VPC = \sum_{j=0}^n \left[ \frac{C_j}{(1+i)^j} \right] \quad (8)$$

**Tabla 41.** Valores del VPC durante el horizonte de evaluación para la Coagulación – Flocculación Optimizada.

Horizonte de evaluación	Valor presente	Horizonte de evaluación	Valor presente
2014	\$4,959,484.00	2025	\$3,170,051.86
2015	\$9,845,699.89	2026	\$2,830,403.45
2016	\$8,790,803.48	2027	\$2,527,145.94
2017	\$7,848,931.67	2028	\$2,256,380.30
2018	\$7,007,974.71	2029	\$2,014,625.27
2019	\$6,257,120.28	2030	\$1,798,772.56
2020	\$5,586,714.53	2031	\$1,606,046.93
2021	\$4,988,137.98	2032	\$1,433,970.47
2022	\$4,453,694.62	2033	\$1,280,330.78
2023	\$3,976,513.05	2034	\$1,143,152.48
2024	\$3,550,458.08	VPN	\$87,326,412.33

Con los valores obtenidos del VP a lo largo del horizonte de evaluación se obtiene el CAE utilizando la ecuación (9) presentada en el los Fundamentos económicos.

$$CAE = VPC \left[ \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (9)$$

Se obtiene como resultado:

$$CAE = \$87,326,412.33 \left[ \frac{0.12 \cdot (1 + 0.12)^{20}}{(1 + 0.12)^{20} - 1} \right]$$

$$CAE = \$11,691,153.55$$



## Análisis de sensibilidad

Para realizar este análisis se hizo una variación en tres parámetros: inversión, insumos, operación y mantenimiento. El objetivo de este análisis es observar el comportamiento del CAE cuando se las variables cambian en un rango de -20% a un 20%.

En la Tabla 42 y Tabla 43 se presenta la variación de estos parámetros con respecto al CAE para el sistema de Decantación Lastrada.

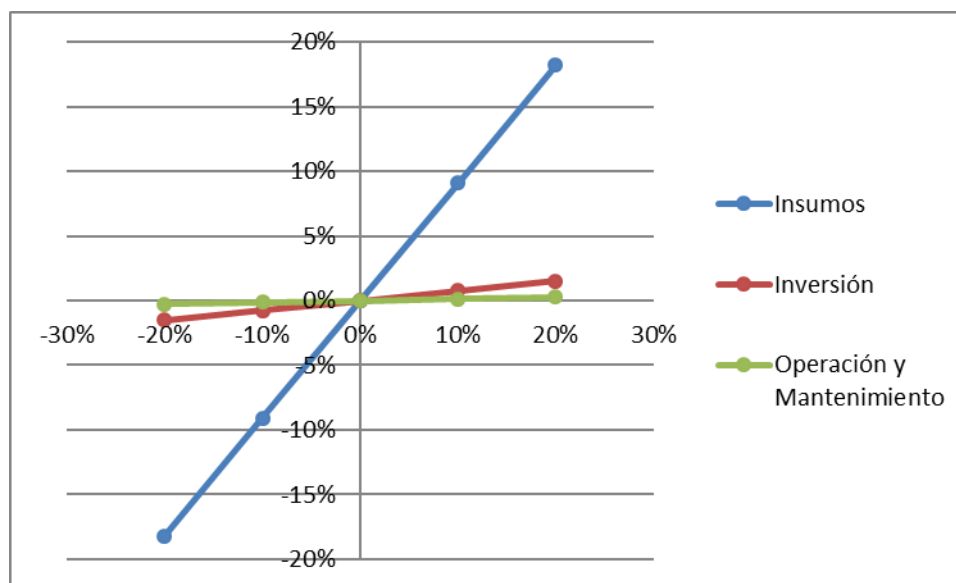
**Tabla 42.** Variación del CAE en USD\$ para la Decantación Lastrada

Análisis de sensibilidad de Decantación Lastrada					
% de variación	-20%	-10%	0%	10%	20%
<b>Insumos</b>	\$9,830,063.81	\$10,925,032.57	\$12,020,001.34	\$13,114,970.10	\$14,209,938.86
<b>Inversión</b>	\$11,840,710.88	\$11,930,356.11	\$12,020,001.34	\$12,109,646.57	\$12,199,291.80
<b>Operación y Mantenimiento</b>	\$11,985,229.06	\$12,002,615.20	\$12,020,001.34	\$12,037,387.48	\$12,054,773.62

**Tabla 43.** Variación del CAE en % para la Decantación Lastrada

Análisis de sensibilidad de Decantación Lastrada					
% de variación	-20%	-10%	0%	10%	20%
<b>Insumos</b>	-18.22%	-9.11%	0.00%	9.11%	18.22%
<b>Inversión</b>	-1.49%	-0.75%	0.00%	0.75%	1.49%
<b>Operación y Mantenimiento</b>	-0.29%	-0.14%	0.00%	0.14%	0.29%

En la Figura 25 se observa la variación de los parámetros de inversión, insumos, operación y mantenimiento con respecto al indicador económico CAE.



**Figura 25.** Gráfica del análisis de sensibilidad del CAE para la Decantación Lastrada.

En la Tabla 44 y Tabla 45 se presenta la variación de estos parámetros con respecto al CAE para el sistema de Coagulación - Floculación Optimizada.

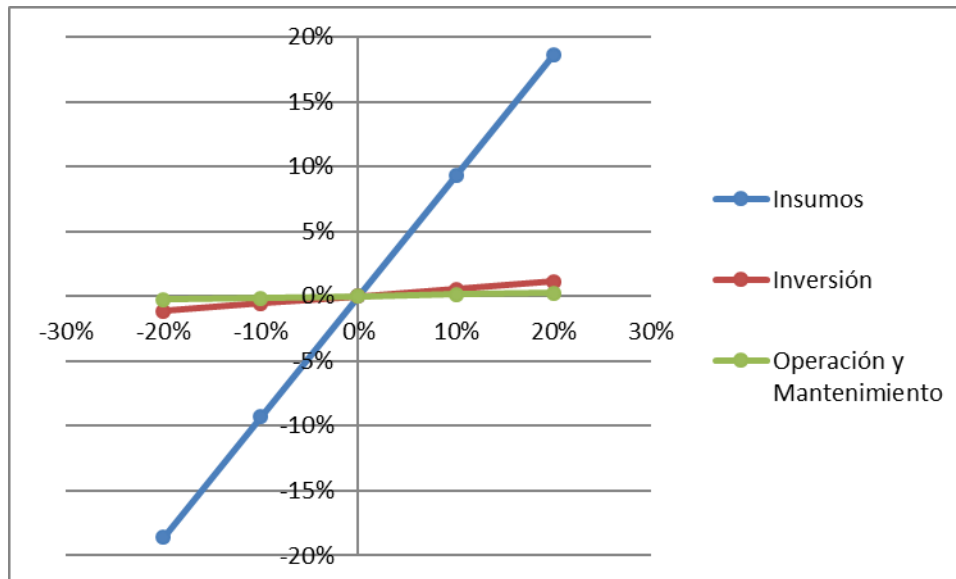
**Tabla 44.** Variación del CAE en USD\$ para la Coagulación – Floculación Optimizada

<b>Análisis de sensibilidad de Coagulación-Floculación Optimizada</b>					
<b>% de variación</b>	-20%	-10%	0%	10%	20%
<b>Insumos</b>	\$9,625,159.46	\$10,726,479.65	\$11,827,799.85	\$12,929,120.05	\$14,030,440.24
<b>Inversión</b>	\$11,695,005.92	\$11,761,402.88	\$11,827,799.85	\$11,894,196.82	\$11,960,593.78
<b>Operación y Mantenimiento</b>	\$11,797,674.21	\$11,812,737.03	\$11,827,799.85	\$11,842,862.67	\$11,857,925.50

**Tabla 45.** Variación del CAE en % para la Coagulación – Floculación Optimizada

<b>Análisis de sensibilidad de Coagulación-Floculación Optimizada</b>					
<b>% de variación</b>	-20%	-10%	0%	10%	20%
<b>Insumos</b>	-18.62%	-9.31%	0.00%	9.31%	18.62%
<b>Inversión</b>	-1.12%	-0.56%	0.00%	0.56%	1.12%
<b>Operación y Mantenimiento</b>	-0.25%	-0.13%	0.00%	0.13%	0.25%

En la Figura 26 se observa la variación de los parámetros de inversión, insumos, operación y mantenimiento con respecto al indicador económico CAE.



**Figura 26.** Gráfica del análisis de sensibilidad del CAE para la Coagulación – Floculación Optimizada

#### Anexo IV. Referencias de Plantas instaladas.

##### Proceso Decantación Lastrada: Algunas Referencias Municipales e Industriales

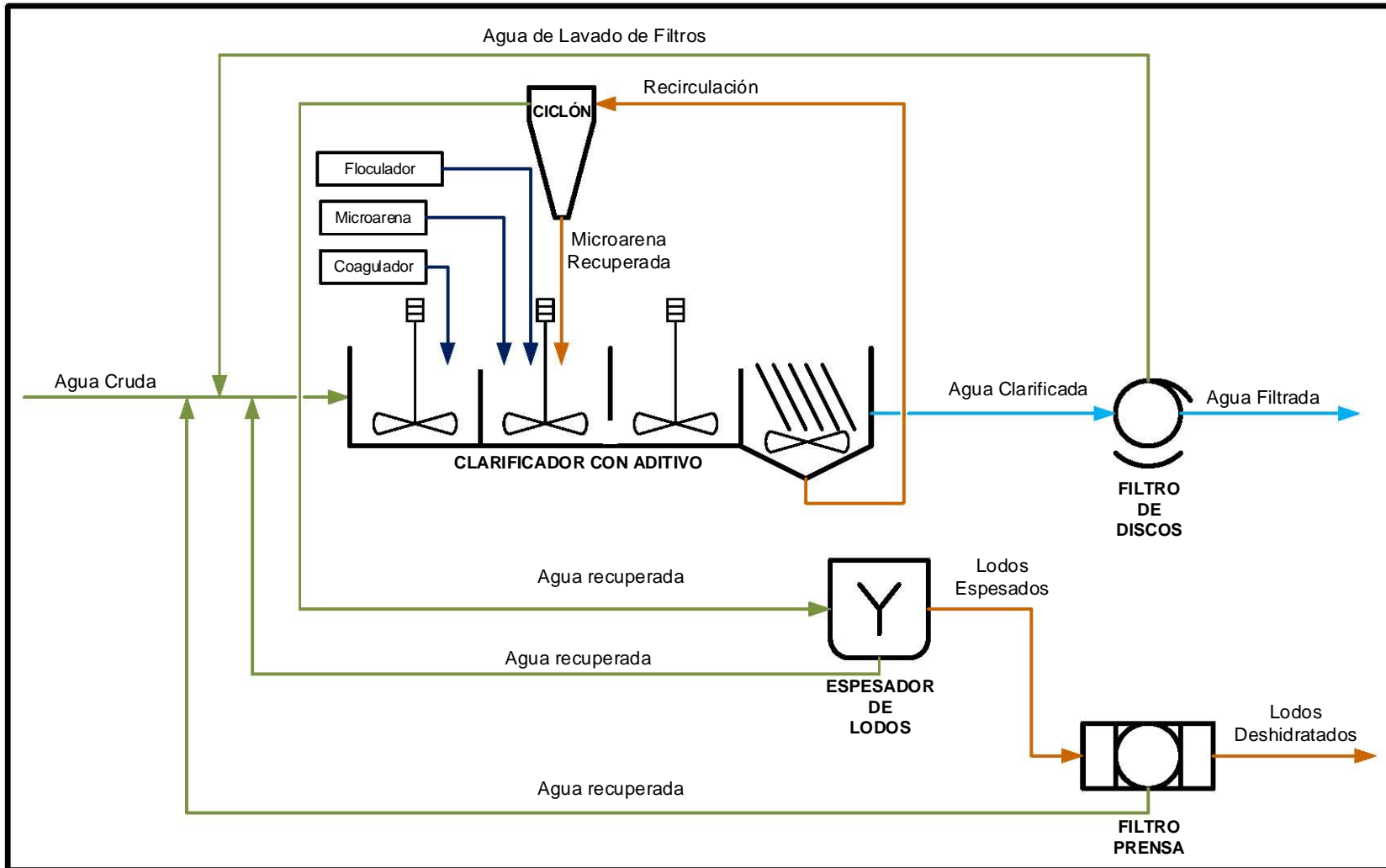
No.	Planta	Aplicación	Capacidad de Producción (m <sup>3</sup> /día)
1	Québec (Canadá)	Agua Potable	240,000
2	Denia (España)	Agua Potable	24,000
3	Kuala Lumpur (Malasia)	Agua Potable	960,000
4	Valladolid (España)	Agua Potable	17,280
5	Bahía de Tampa (EUA)	Agua Potable	280,800
6	Wollongong (Australia)	Agua de Tormentas	141,600
7	Elvington (Reino Unido)	Agua Potable	288,000
8	Cassino (Italia)	Agua de Tormentas	48,000
9	Calpe (España)	Agua Potable	15,360
10	Forth Worth (EUA)	Agua de Tormentas	378,000
11	Bruselas (Bélgica)	Agua de Tormentas	686,400

##### Proceso Coagulación – Floculación Optimizado: Algunas Referencias Municipales e Industriales

No.	Planta	Aplicación	Capacidad de Producción (m <sup>3</sup> /día)
1	Yangshupu (China)	Agua Potable	16,800
2	Morsang-sur-Seine	Agua Potable	84,960
3	Les Mureaux	Depuración de aguas Residuales	20,000
4	Mulhouse	Depuración de aguas Residuales	98,000
5	Petróleo y Gas Kerteh (Malasia)	Depuración de aguas Residuales	14,400
6	Wadi Main (Jordania)	Desalación de agua	135,000

## Anexo V. Diagramas de flujo

### Anexo V.a. Sistema de Decantación Lastrada.



## Anexo V.b. Coagulación – Floculación Optimizada

