



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**EVALUACIÓN DE OPCIONES PARA CUBRIR LOS
REQUERIMIENTOS DE AGUA EN LA REFINERÍA ING. ANTONIO M.
AMOR**

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

OSCAR ROSALES CALDERÓN



MÉXICO, D.F.

2008



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: JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA
Vocal: Dr. VÍCTOR MANUEL LUNA PABELLO
Secretario: Dr. ALFONSO DURAN MORENO
1^{er}. Suplente: MANUEL LÓPEZ RAMOS
2^{do}. Suplente: JOSÉ AGUSTÍN GARCÍA REYNOSO

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Conjunto E. UNAM, Ciudad Universitaria. MÉXICO, DISTRITO FEDERAL

TUTOR DE TESIS:

Dr. ALFONSO DURÁN MORENO

SUSTENTANTE:

ROSALES CALDERÓN OSCAR

Agradecimientos

A mis padres, que me han guiado admirablemente a lo largo de mi vida y por el gran esfuerzo que han hecho para brindarme apoyo en todos los aspectos de mi vida. A mi padre por entenderme y enseñarme a vivir como un niño. A mi madre por su gran cariño y por mostrarme el camino en los momentos difíciles. Lo que soy y lo que llegue a ser, será gracias a ellos, no importa la grandeza que pueda alcanzar, siempre seré tan sólo la sombra de mis padres.

A mi hermano por ser siempre mi compañero y amigo, por su confianza y por todas las aventuras y momentos divertidos que hemos pasado.

A mi familia, que ha construido las bases de mis valores, por su alegría, por su cariño, por su apoyo, por sus consejos, por enseñarme a aprender todo lo posible, por desarrollar una ideología plural en mí, por enseñarme sobre música, literatura, pintura, fotografía, cine, por narrarme sus experiencias y por mantenerme siempre en la realidad.

A Mónica, por toda su atención, ayuda, consejo, paciencia y cariño en estos últimos años, gracias por caminar junto a mí.

A mis amigos, quienes me ofrecieron su confianza y conocimiento, todos aquellos que he conocido desde mi niñez y que se encuentran en mi memoria, imborrables. Gracias por sus experiencias, enseñanzas y compañía, no sería gran cosa sin ellos.

A las personas que particularmente no me agradaron, no me agradan, ni me agradarán, gracias, pues es necesario mencionarlas, ya que me hubiese sido imposible ver la grandeza de las personas si no hubiera conocido la estupidez de otras.

Al arte, gracias a los grandes maestros por sus obras, este legado equilibrio mi vida durante los años de estudio y la hizo más interesante.

El perdedor

y el siguiente recuerdo es que estoy sobre una mesa,
todos se han marchado: el más valiente bajo los focos, amenazante, tumbándome a golpes....
y después un tipo asqueroso de pie, fumado un puro:
<< Chico, tu no sabes pelear>> me dijo.
y yo me levanté y le lancé de un golpe por encima
de una silla.

fue como una escena de película y allí quedó sobre su enorme trasero diciendo sin cesar << Dios mío, Dios mío, pero ¿ qué es lo que te ocurre?>> y yo me levanté y me vestí, las manos aún vendadas, y al llegar a casa me arranqué las vendas de las manos y escribí mi primer poema,
y no he dejado de pelear desde entonces.

Bien, así es la cosa...

A veces cuando todo parece ir de mal en peor
cuando todo conspira
y corroe
y las horas, días, semanas, años
parecen desperdiciados
tendido sobre mi cama
en la oscuridad
mirando hacia el techo
concibo lo que muchos considerarán un detestable pensamiento:
aún es agradable ser Bukowski.

Charles Bukowski

El arte no enseña nada más que el significado de la vida.

Henry Miller

ÍNDICE

1	RESUMEN	14
2	INTRODUCCIÓN	15
2.1	Objetivo global	15
2.2	Justificación	15
2.3	Motivación	16
2.4	Hipótesis	17
3	FUNDAMENTOS	18
3.1	Introducción al área de estudio y situación del caso a tratar	18
3.1.1	Situación ambiental	18
3.1.2	Proceso de Refinación	21
3.1.3	Consumo de agua en una refinería	24
3.1.4	Reúso de agua tratada en una refinería	26
3.1.5	Plantas de tratamiento de agua residual	28
3.1.5.1	Procesos de tratamiento físico-químico	31
3.1.5.1.1	Cribado	32
3.1.5.1.2	Desarenado	33
3.1.5.1.3	Ablandamiento químico: Coagulación y Floculación	34
3.1.5.1.4	Filtros de arena	36
3.1.5.1.5	Unidades de adsorción por carbón activado	38
3.1.5.1.6	Suavización	39
3.1.5.1.7	Ultrafiltración	40
3.1.5.1.8	Ósmosis Inversa	41
3.1.5.1.9	Cloración	44
3.1.5.2	Procesos de tratamiento biológico	45
3.1.5.2.1	Proceso de lodos activados	46
3.1.5.2.1.1	Principios de funcionamiento	47
3.1.5.2.1.2	Lodos activados con aeración prolongada o aeración extendida	48
4	METODOLOGÍA	50

4.1	Metodología para la evaluación de alternativas de inversión	52
4.2	Desarrollo de la metodología.....	52
4.2.1	Aspectos técnicos del proceso	54
4.2.2	Aspectos técnicos complementarios	55
4.2.3	Aspectos económico-financieros	57
4.2.4	Aspectos contractuales	58
4.2.5	Aspectos plausibles.....	59
4.2.6	Aspectos estratégico-tácticos.....	60
4.2.7	Aspectos normativos	61
4.3	Metodología de evaluación.....	62
5	CASO DE ESTUDIO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
5.1	Recopilación y análisis de información sobre los sistemas actuales de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	69
5.2	Calidades de agua de los sistemas actuales de suministro de la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	74
5.3	Costos de los sistemas actuales de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	76
5.4	Definición de los flujos y calidades de agua para las nuevas plantas de proceso.....	79
5.5	Definición de flujos para las nuevas plantas de Calidad de Combustibles	81
5.6	Planteamiento y evaluación de opciones de suministro de agua para las nuevas plantas de proceso.....	84
5.6.1	Consideraciones para disminuir el consumo de agua de pozo	84
5.6.2	Opciones de sustitución de agua de pozos y de suministro de agua para las nuevas plantas del proyecto de Calidad de Combustibles.....	86
5.6.2.1	Sustitución de agua de pozos con agua tratada de la PTAN Irapuato	88
5.6.2.1.1	Opciones de pretratamiento para alcanzar la calidad requerida de servicio a TE y UDA's	94
5.6.2.1.2	Ventajas y desventajas de la opción PTAN Irapuato	96
5.6.2.1.3	Costos de la opción PTAN Irapuato	97
5.6.2.2	Sustitución de agua de pozos con agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	99

5.6.2.2.1	Opción de tratamiento para alcanzar calidad requerida de servicio a torres y UDA's.....	101
5.6.2.2.2	Ventajas y desventajas de la opción Sustitución de agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	104
5.6.2.2.3	Costos de la opción Sustitución de agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	105
5.6.2.3	Sustitución de agua de pozos con agua tratada de una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero.....	107
5.6.2.3.1	Tratamientos requeridos para alcanzar calidad de agua a TE y UDA's..	109
5.6.2.3.2	Ventajas y desventajas de la opción de compra de agua tratada a una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero.....	109
5.6.2.3.3	Costos de la opción de sustitución de agua de pozos con agua tratada de una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero.....	110
5.6.2.4	Sustitución de agua de pozos incrementando el agua tratada de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	110
5.6.2.4.1	Ventajas y desventajas de la opción de incremento de agua tratada por la PTAR de refinería Ing. Antonio M. Amor.....	113
5.6.2.4.2	Particularidades y costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	114
5.6.2.4.2.1	Particularidades y Costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR y compra de agua tratada a la PTAN Irapuato.	114
5.6.2.4.2.2	Particularidades y costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor e instalación de una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor para tratar agua negra de Celaya.....	117
5.6.2.4.2.3	Particularidades y costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua a una PTAN en Salamanca propiedad de un Tercero.....	120
5.7	Evaluación de las opciones tecnológicas.....	121
5.7.1	Definición de los aspectos a considerar en la evaluación.....	122
5.7.2	Identificación de los subaspectos o factores restrictivos.....	123
5.7.3	Decisión del tipo de evaluación.....	125

5.7.4	Desarrollo de la técnica matricial de evaluación.....	126
5.7.5	Selección de los subaspectos y factores para cada aspecto	126
5.7.6	Asignación de los puntajes o pesos para los subaspectos y factores de cada aspecto..	128
5.7.7	Asignación de la escala de calificación	130
5.7.8	Calificación de los factores considerados, usando la escala descrita	130
5.7.9	Comparación técnica de opciones.....	134
5.7.10	Generación de la matriz de resultados de la evaluación	138
5.7.11	Análisis de resultados.....	142
6	CONCLUSIONES FINALES	145
7	BIBLIOGRAFÍA	148
8	REFERENCIAS ELECTRONICAS.....	150

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Calidad de combustibles 2005	19
Tabla 2.	Especificaciones generales de las gasolinas	20
Tabla 3.	Consumo de agua en algunas refinerías	25
Tabla 4.	Índices de demanda y descarga promedio de agua.	25
Tabla 5.	Operaciones físicas empleadas en el tratamiento de aguas residuales.....	31
Tabla 6.	Procesos químicos empleados en el tratamiento de las aguas residuales	32
Tabla 7.	Rejas usadas en cribado.....	33
Tabla 8.	Aspectos a considerar en la evaluación.....	64
Tabla 9.	Ejemplo sobre elección de Aspectos: "evaluación técnica del proceso"	66
Tabla 10.	Escala de calificación de atributos.....	67
Tabla 11.	Consumo de agua en refinería Ing. Antonio M. Amor.....	70
Tabla 12.	Estadísticos de consumo de agua de pozos y agua residual tratada. Período 2006-2007.....	71
Tabla 13.	Estadísticos sobre calidad de agua de pozos. Período 2005	74
Tabla 14.	Estadísticos sobre calidad de agua de pozos. Período 2006	74
Tabla 15.	Estadísticos sobre calidad de agua de PTAR. Período 2004	75
Tabla 16.	Estadísticos sobre calidad de agua de PTAR. Período 2006	75
Tabla 17.	Calidad promedio actual de agua de repuesto a Torres de Enfriamiento.....	76
Tabla 18.	Estadísticos sobre los costos totales referentes al consumo de agua de pozos y agua residual tratada. Período 2005-2006.....	77
Tabla 19.	Calidad requerida de agua a UDA's	79
Tabla 20.	Límites máximos permisibles de calidad de agua de repuesto a Torres de Enfriamiento.....	80
Tabla 21.	Requerimientos de agua de suministro del proyecto Calidad de Combustibles en sus dos etapas.....	81
Tabla 22.	Requerimientos de suministro a refinería Ing. Antonio M. Amor considerando los requerimientos del PCC.....	81
Tabla 24.	Requerimientos de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor	85

Tabla 25.	Distancia y altura de las posibles nuevas opciones de suministro respecto a la refinería Ing. Antonio M. Amor	87
Tabla 26.	Porcentaje de remoción de contaminantes de acuerdo a datos del Laboratorio externo y de la PTAN Irapuato.....	90
Tabla 27.	Tabla comparativa de calidades de agua actuales y calidad de agua PTAN Irapuato.....	91
Tabla 28.	Comparativa de calidad de agua requerida a torres y calidad de agua PTAN Irapuato.....	93
Tabla 29.	Opciones de pretratamientos para elevar la calidad del efluente de la PTAN Irapuato.....	95
Tabla 30.	Ventajas y desventajas de la opción PTAN Irapuato.....	96
Tabla 31.	Costos de la opción de compra de agua tratada a la PTAN Irapuato (USD).....	97
Tabla 32.	Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD).....	98
Tabla 33.	Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD).....	98
Tabla 34.	Composición típica de un agua residual municipal sin tratar.....	102
Tabla 35	Ventajas y desventajas de la opción Agua Negra Celaya con PTAN de la RIAMA.	105
Tabla 36.	Costos de la opción sustitución de agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor (USD).....	106
Tabla 37.	Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD).....	106
Tabla 38.	Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD)	107
Tabla 39.	Ventajas y desventajas de la opción de compra de agua a una PTAN operada y propiedad de un tercero.....	109
Tabla 40.	Ventajas y desventajas de la opción de incremento del agua tratada por PTAR de refinería Ing. Antonio M. Amor	114
Tabla 41.	Costos de la opción de incremento de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua a la PTAN Irapuato (USD)	115
Tabla 42.	Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD).....	116
Tabla 43.	Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20%..... (USD).....	117

Tabla 44.	Costos del suministro de agua tratada con modernización a PTAR y agua negra de Celaya tratada por una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor...	118
Tabla 45.	Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD).....	119
Tabla 46.	Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD).....	119
Tabla 47.	Costos de la opción de incremento de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua a una PTAN en Salamanca propiedad de un tercero (USD).....	121
Tabla 48.	Aspectos considerados en la evaluación de las alternativas.....	122
Tabla 49.	Subfactores o filtros restrictivos considerados para la evaluación.....	123
Tabla 50.	Cumplimiento de las alternativas con los criterios restrictivos o filtros.....	124
Tabla 51.	Puntaje asignado a cada aspecto considerado.....	126
Tabla 52.	Subaspectos y factores considerados para cada aspecto.....	127
Tabla 53.	Pesos asignados a los subaspectos y factores para cada aspecto utilizado.....	128
Tabla 54.	Determinación de la escala de calificación.....	130
Tabla 55.	Criterios de calificación.....	131
Tabla 56.	Comparación de opciones.....	135
Tabla 57.	Evaluación de opciones.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema del proceso de una refinería	22
Figura 2.	Usos del agua en una refinería	24
Figura 3.	Grados de tratamiento del agua residual	29
Figura 4.	Diagrama básico de un proceso de separación de membranas	41
Figura 5.	Diagrama básico de separación por ósmosis	42
Figura 6.	Correlación de propiedades de membranas con intervalos de separación	43
Figura 7.	Visión ampliada de un proyecto	53
Figura 8.	Metodología de evaluación de alternativas tecnológicas	63
Figura 9.	Consumo de agua extraída de pozos y de PTAR, periodo 2006-2007	71
Figura 10.	Balance de consumo actual de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor	73
Figura 11.	Costos totales del consumo de agua de pozos y agua de PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor (\$ M.N.). Periodo 2005 y 2007.	78
Figura 12.	Balance de consumo de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor considerando el Proyecto Calidad de Combustibles	83
Figura 13.	Suministro de agua por PTAN Irapuato.....	88
Figura 14.	Recorrido vía carretera de PTAN Irapuato a RIAMA 24 km	89
Figura 15.	Suministro de agua negra Celaya con PTAN en RIAMA.....	99
Figura 16.	Recorrido vía carretera de Celaya a la refinería Ing. Antonio M. Amor. 34 km..	100
Figura 17.	Espacios disponibles dentro de las instalaciones de la refinería Ing. Antonio M. Amor	101
Figura 18.	Opción general de tratamiento para una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor	103
Figura 19.	Opción de tratamiento para una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor.....	104
Figura 20.	Suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor por una PTAN en Salamanca propiedad de un tercero.....	108
Figura 21.	Repartición de agua con modernización a la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor	112
Figura 22.	Suministro de agua tratada con modernización a PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y agua tratada de la PTAN Irapuato.....	115

Figura 23. Suministro de agua tratada con modernización a PTAR y agua negra de Celaya tratada por una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor 118

Figura 24. Suministro de agua con modernización a PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua tratada a una PTAN en Salamanca operada y propiedad de un tercero..... 120

1 RESUMEN

En el presente trabajo se proponen, desarrollan y evalúan opciones de suministro de agua cruda a la refinería Ing. Antonio M. Amor con la finalidad de proponer una opción de suministro de agua cruda que sea capaz de sustituir el actual suministro de agua cruda a la refinería Ing. Antonio M. Amor. Este trabajo surge como respuesta a la necesidad de terminar con la extracción de agua cruda de pozos, usada actualmente como suministro de agua cruda a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

Para el análisis del caso de estudio, se usaron datos históricos que reflejan la operación de los actuales suministros de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor, en base a los cuales se determinaron los flujos y calidades de agua de suministro requeridas por la refinería. Aunado a estos requerimientos se evaluaron e implementaron los requerimientos del Proyecto de Calidad de Combustibles (PCC) en la refinería Ing. Antonio M. Amor.

A partir de los datos anteriores se presentaron seis opciones de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor, que se mencionan en seguida: compra de agua negra tratada a la PTAN Irapuato, compra de agua negra al municipio de Celaya para su tratamiento en la refinería Ing. Antonio M. Amor; compra de agua tratada a una PTAN operada y propiedad de un tercero; y la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor en conjunto con las tres opciones anteriormente planteadas.

Se desarrolló cada una de las opciones propuestas, presentando datos disponibles e información particular de cada una de ellas, con la finalidad de realizar una evaluación de estas opciones por medio de un método matricial. Se eligió el usar un método matricial de evolución, debido a la flexibilidad de criterios de valoración y a la objetividad proporcionada por esta metodología. Usando este método se asignaron puntajes a las propiedades o aspectos de las propuestas de suministro, con la finalidad de realizar una evaluación cuantitativa.

Como resultado de la evaluación matricial se obtuvo un puntaje para cada una de las opciones de suministro propuestas, obteniendo así un mayor puntaje la opción de suministro que proporcione mayores beneficios a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Objetivo global

El objetivo de la presente tesis es fundamentar, evaluar y seleccionar la opción técnica y ambiental más conveniente para el suministro de agua, con la cantidad y calidad requerida por la refinería Ing. Antonio M. Amor, considerando la implementación de las plantas del proyecto de Calidad de Combustibles.

2.2 Justificación

En la actualidad el agua es un recurso natural que es indispensable y costoso para la industria, ya que su disponibilidad es cada vez menor. Esta situación ha llevado, desde hace varias décadas, a iniciar una serie de esfuerzos para encontrar una solución a este problema. Una de las propuestas vino del ámbito industrial y lo que busca es la recuperación de las aguas residuales provenientes de una inmensa diversidad de procesos que se llevan a cabo en la industria a nivel mundial. En sus inicios, el tratamiento de aguas residuales fue visto por las industrias simplemente como un requisito para cumplir con normatividades y disposiciones gubernamentales, actualmente este concepto ha cambiado y el tratamiento de agua residual es uno de los avances tecnológicos más importantes para el abastecimiento de agua de uso industrial.

En México, grandes sectores de la industria, incluyendo la petrolera, han implantado en sus centros de producción, sistemas y procesos de tratamiento para sus aguas residuales; que les han permitido abastecerse de agua a algunos de sus procesos, evitando de esta forma utilizar agua de primer uso.

Generalmente el tratamiento de agua residual que usa la industria no es suficiente para cubrir el 100% sus requerimientos, ya que este reuso del agua a nivel industrial no puede ser ilimitado debido a la cantidad de agua que necesariamente debe ser purgada del sistema para

evitar acumulación de sustancias en el proceso. Esto ha originado que industrias, incluso paraestatales como Petróleos Mexicanos (PEMEX), llegaran a acuerdos para tratar parte de las aguas residuales locales (municipales) y de ésta forma obtener otra fuente de agua para sus procesos.

El problema de abastecimiento de agua en las industrias, en conjunto con el crecimiento de las mismas y su consecuente aumento en requerimientos de materias primas y servicios, incluida el agua, ha llevado a aquellas industrias que cuentan con una planta de tratamiento de aguas residuales, a modernizarlas mediante la introducción de nuevas tecnologías, procesos o equipos. Lo anterior, con la finalidad de asegurar el abastecimiento de agua de estas fuentes y de ser posible, incrementar sus capacidades de tratamiento de agua. En otros casos, sólo se requiere de rehabilitaciones o mantenimiento integral a equipos o a una parte del proceso; para asegurar el funcionamiento continuo y eficiente de la planta de tratamiento, e incrementar la vida útil de la misma.

La finalidad del presente trabajo, el cual tiene fines meramente académicos, es la de realizar un estudio para definir opciones viables para sustituir la extracción de agua de pozos por un suministro agua proveniente de una planta de tratamiento de agua residual municipal (aguas negras), tomando como ejemplo a la Refinería Ing. Antonio M. Amor que se encuentra ubicada en el municipio de Salamanca.

2.3 Motivación

Existen dos principales motivos para la realización de este proyecto, uno es el aprovechamiento del agua residual y el otro, el apoyo a la creación de nuevos combustibles de alta calidad. Estas razones, a su vez, apoyan al desarrollo de una industria limpia y hacen énfasis en el cuidado el medio ambiente.

El motivo más palpable por el que se realizó el presente proyecto, es el de buscar una solución para que el suministro de agua de pozos a la refinería Ing. Antonio M. Amor, cambie por uno de agua tratada. En la actualidad es preocupante la cantidad de agua que se contamina minuto

a minuto, por lo que, la actual practica de la refinería Ing. Antonio M. Amor de extraer agua de pozos ya no es una opción viable, ni ambiental, ni económicamente. Con el tiempo ha ido disminuyendo la cantidad de agua existente en los pozos, por lo que es necesario tomar medidas preventivas, antes de llegar a un punto en que no se pueda extraer más agua del subsuelo y antes de que comiencen a agravarse los problemas secundarios causados por estas prácticas, como los hundimientos de ciertas zonas de la Salamanca que han comenzado a manifestarse.

Otra razón para buscar una nueva fuente de agua para la refinería Ing. Antonio M. Amor, es que el costo del agua ha aumentando y no se han autorizado nuevas aperturas de pozos para su extracción. Por ello, con la realización de este proyecto se está tratando de cuidar la presente y futura existencia de agua en el manto acuífero, lo que permitirá evitar los estragos que provocaría su ausencia para la comunidad aledaña a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

El segundo agente que es causa indirecta de este proyecto, es la producción de combustibles que generen una menor cantidad de emisiones contaminantes a la atmósfera. De tal forma que el presente proyecto es uno de los engranes de un proyecto más grande, el proyecto de calidad de combustible (PCC). Con este último se contribuirá al cuidado del medio ambiente, acción que repercutirá en la vida de millones de personas y más directa a la población, en la de los habitantes de nuestra nación, logrando así construir y preservar un mejor lugar para las generaciones futuras.

2.4 Hipótesis

Si se realiza una evaluación matricial que valore las opciones propuestas para sustituir el actual suministro de agua de pozos de la refinería Ing. Antonio M. Amor, que considere los aspectos económicos, técnicos y plausibles (sociales y ambientales), entonces será posible determinar la propuesta de suministro de agua que aporte mayores beneficios a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

3 FUNDAMENTOS

3.1 Introducción al área de estudio y situación del caso a tratar

Dentro de este apartado se presenta la situación del caso de estudio, así como la introducción en materia de los procesos que engloba, es decir, el por qué surge este trabajo, así como los procesos generales de una refinería y los utilizados en el tratamiento de agua.

3.1.1 Situación ambiental

En la actualidad uno de los problemas más graves al que se enfrenta México es la fuerte contaminación del aire, debida a las altas concentraciones de azufre en los combustibles. Esto ha sido causado por el aumento de la flota de vehículos en nuestro país. En la tabla 1 (Sierra, 2005) se muestran las concentraciones de azufre en la gasolina para el año 2005, para periodos más recientes, la información sobre las concentraciones reales del azufre en las gasolinas de PEMEX no se encontró disponible.

Si no se propone y se lleva a cabo una solución, el problema de contaminación de aire en nuestro país estaría aumentando exponencialmente. De esta manera, la comercialización de combustibles con una baja concentración de azufre, permitirá que las tecnologías vehiculares modernas disponibles ya en Europa y Estados Unidos, funcionen adecuadamente en México, provocando una disminución significativa en las emisiones contaminantes. Esta disminución de emisiones también abarca a los vehículos con tecnologías anteriores. Así, en aquellos vehículos de gasolina, las emisiones de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) pueden reducirse entre 50 y casi 80 % (SEMARNAT, PEMEX-Refinación, INA, 2006).

Tabla 1. Calidad de combustibles 2005

Gasolina	Situación 2005		Especificaciones 2005	
	PEMEX Magna		PEMEX Magna	
	ZMVM (1)	Resto del País	ZMVM (1)	Resto del País
Octanaje	82	82	82	82
Azufre (ppm)	408	714	1000 máx. RP(2) 500 máx. ZM (3)	300 máx. 250 prom.

Notas:

(1)ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México)

(2)ZM: Zonas metropolitanas (Valle de México, Guadalajara y Monterrey)

(3)RP: Resto del país.

La disminución en la emisión de estos contaminantes a la atmósfera conlleva una mejor calidad de aire. Ésta es una prioridad para la protección de la salud pública, dado que la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en América Latina los niveles actuales de contaminación de la atmósfera han provocado en promedio 35 mil muertes prematuras cada año (Cohen, 2004).

Cabe indicar que el 30 de enero del 2006 se publicó la norma NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005, la cual plantea nuevas especificaciones para el contenido de azufre, olefinas, y bencenos entre otros, para los combustibles que se vendan en México, las concentraciones establecidas por esta norma se muestran en la tabla 2 (SEMARNAT, 2005). Por tal motivo, PEMEX lanzó su Proyecto de Calidad de Combustibles (PCC), en el que busca adecuar sus concentraciones de azufre conforme a lo establecido en la norma NOM-86-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Con lo que las plantas de procesos de las refinerías deberán adecuarse a estos nuevos parámetros y con ellas también los servicios requeridos por los procesos; por ello en todas las refinerías se harán cambios en la estructura de los procesos de producción de diesel y gasolina (SEMARNAT, PEMEX-Refinación, INA, 2006)

Tabla 2. Especificaciones generales de las gasolinas⁽¹⁾

Nombre del producto: Propiedad	Unidad	PEMEX Premium	PEMEX Magna
Peso específico a 20°C		Informar	Informar
Prueba Doctor o Azufre Mercaptánico	ppm EN PESO	Negativa 20 máximo	Negativa 20 máximo
Corrosión al Cu, 3 Horas a 50°C		Estándar # 1 máximo	Estándar # 1 máximo
Goma preformada	g/L	0.040 máximo	0.040 máximo
Gomas no lavadas	g/L	0.7 máximo	0.7 máximo
Azufre,	ppm EN PESO	250 promedio 300 máximo Octubre 2006: 30 promedio / 80 máximo	300 promedio, 500 máximo: ZMVM, ZMG, ZMM (7) Octubre 2008: 30 promedio / 80 máximo Resto del País (2) Enero 2009: 30 promedio/ 80 máximo
Periodo de inducción	minutos	300 mínimo	300 mínimo
Número de Octano (RON) (8)		95 mínimo	Informar
Número de octano (MON) (8)		Informar	82 mínimo
Índice de Octano (RON+MON)/2		92 mínimo	87 mínimo
Contenido de fósforo	g/l	0.001 máximo	0.001 máximo
Color(3)		Informar (4)	rojo (5)
Aditivo detergente dispersante (6)	mg/kg	Según aditivo, en la cantidad que permita que el combustible pase las pruebas indicadas de restricción de flujo en los inyectores y de formación de depósitos en las Válvulas de admisión.	

Notas:

(1) Las especificaciones aplican a centros de producción.

(2) Para esta Tabla, se considera Resto del País toda la extensión del territorio nacional excluyendo las Zonas Metropolitanas del Valle de México, de Guadalajara y de Monterrey.

(3) Para fines de comparación se colocan la muestra tipo y la gasolina en botellas de 120 ml (aproximadamente 4 onzas).

(4) No se agrega anilina ni otro colorante a la gasolina Pemex Premium.

(5) El color rojo de la gasolina, logrado con 2 mg de anilina por cada litro de gasolina debe igualar al de una muestra patrón que se prepara en solución acuosa como sigue:

Compuesto	Concentración
CoCl ₂ .6H ₂ O	5.3 kg/m ³
H ₂ SO ₄ 1N	2.0 dm ³ /m ³

(6) Actualmente se utiliza el aditivo IMP DG-15 que efectivamente mantiene los niveles de depósitos establecidos en los métodos de prueba indicados.

(7) ZMVM (Zona Metropolitana del Valle de México), ZMG (Zona Metropolitana de Guadalajara), ZMM (Zona Metropolitana de Monterrey).

(8) El número de octanos por investigación se identifica en inglés por la sigla RON y el número de octanos de motor, por la sigla MON.

Las nuevas especificaciones de azufre en combustibles requieren inversiones sustanciales en la estructura de refinación de PEMEX, incluyendo la modernización de 18 plantas de destilado intermedio (diesel y turbosinas), la construcción de 11 plantas de postratamiento de gasolina, 4 hidrodesulfuradoras de diesel y 7 plantas secundarias asociadas al proyecto (4 de hidrogeno, 3 de azufre y una de generación de electricidad) (SEMARNAT, PEMEX-Refinación, INA, 2006).

3.1.2 Proceso de Refinación

En México se ubican seis refinerías, en las que el procesamiento de crudo aumenta conforme lo hace la demanda de gasolina; el empleo de petróleo menos pesado está disminuyendo debido a su escasez, lo que implica el uso cada vez más frecuente de petróleo más pesado.

Las refinerías reciben el petróleo en su forma natural, es decir, crudo. En ellas se lleva a cabo el refinado del petróleo, este proceso comienza con la destilación, o fraccionamiento de los crudos en grupos de hidrocarburos separados. El petróleo crudo se calienta en una caldera y se carga en una torre de destilación atmosférica, en donde es separado en butanos, gas húmedo ligero, nafta ligera inestabilizada, nafta pesada, keroseno, gas de petróleo atmosférico y crudo reducido. El crudo reducido es enviado a la torre de destilación al vacío, para ser separado en gas de petróleo al vacío y en crudo reducido al vacío en la parte inferior.

El crudo reducido al vacío proveniente de la torre de destilación al vacío es fragmentado térmicamente para producir gas húmedo, gasolina de coque, gas de petróleo de coque y coque.

Los productos resultantes están directamente relacionados con las características del petróleo crudo que se procesa. La mayoría de estos productos de la destilación se convierten a su vez en productos más útiles cambiando sus estructuras físicas y moleculares mediante craqueo, reforma y otros procesos de conversión. A continuación, estos productos

se someten a diversos procesos de tratamiento y separación (extracción, hidrotratamiento y desmercaptanización), para obtener productos terminados.

Los procesos y operaciones de refino de petróleo se clasifican básicamente en: separación, conversión, tratamiento, formulación y mezcla, operaciones auxiliares y operaciones fuera de proceso. Estos procesos y operaciones se ilustran en la Figura 1 (Kraus, 1998), en ella se muestra el proceso de refinación general de una refinería.

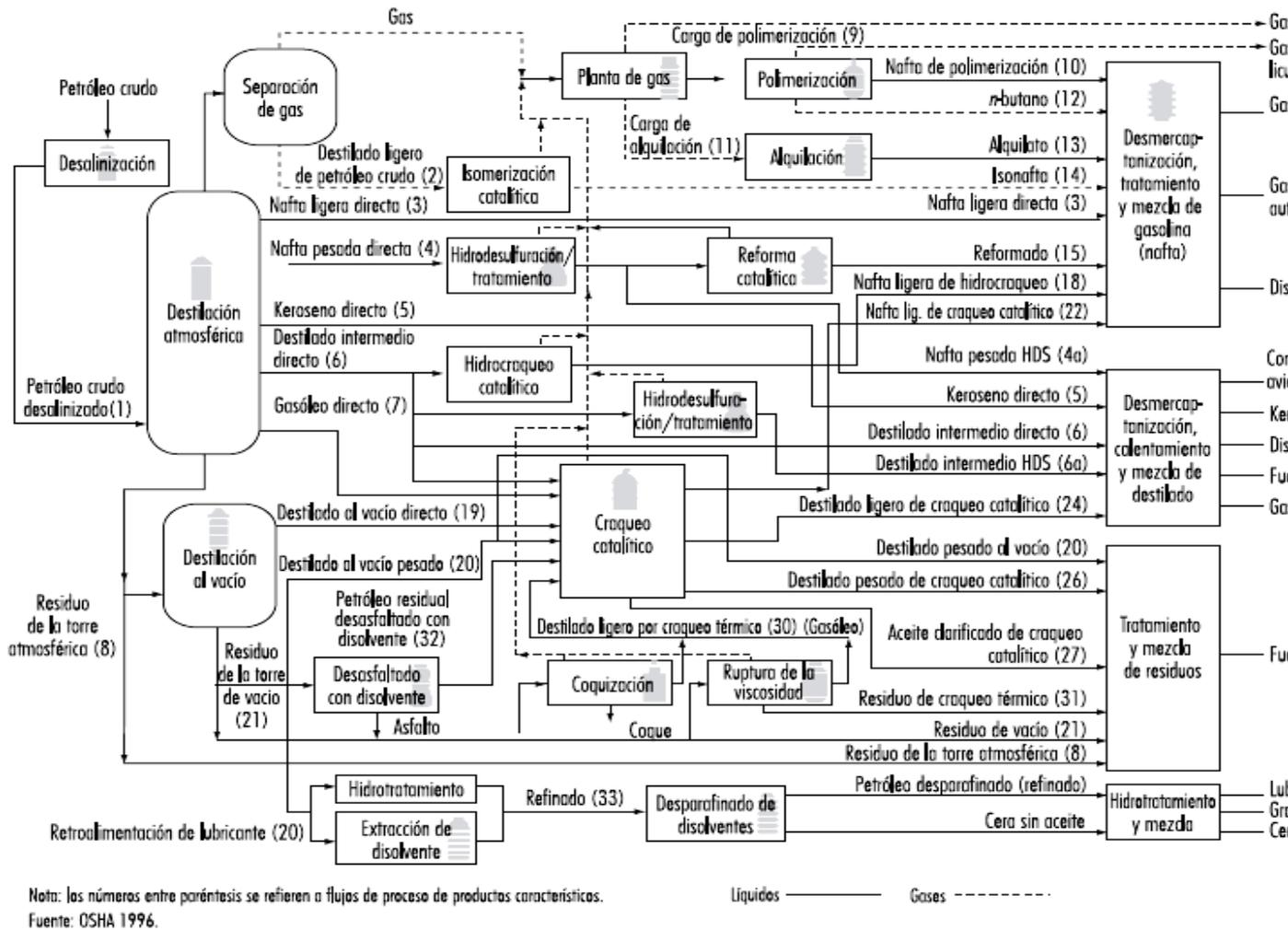


Figura 1. Esquema del proceso de una refinería

En el proceso de separación, el petróleo crudo se separa físicamente, mediante fraccionamiento en torres de destilación atmosféricas y de vacío, en grupos de moléculas de hidrocarburos con diferentes intervalos de temperaturas de ebullición, denominados “fracciones”.

La Conversión modifica el tamaño y/o la estructura de las moléculas de hidrocarburos, los procesos más utilizados son los siguientes:

- Descomposición (división), mediante hidrocrqueo, craqueo térmico y catalítico, coquización y ruptura de la viscosidad;
- Unificación (combinación), mediante alquilación y polimerización;
- Alteración (rectificación), con isomerización y reforma catalítica,

El tratamiento se usa para eliminar hidrocarburos, impurezas y otros constituyentes que afectan negativamente a las propiedades de los productos acabados o reducen la eficacia de los procesos de conversión. El tratamiento implica reacciones químicas y separación física, como disolución, absorción o precipitación, mediante varios procesos y combinaciones de los mismos. Entre los métodos de tratamiento se encuentra la eliminación o separación de componentes aromáticos y naftenos, y la eliminación de impurezas y contaminantes indeseables. Se utilizan compuestos desmercaptanizantes y ácidos para desulfurar el petróleo crudo antes del procesado, y para tratar los productos durante y después de éste (Gary, 2001).

La formulación y mezcla es el proceso en el cual se mezclan y combinan fracciones de hidrocarburos, aditivos y otros componentes para la obtención de productos acabados.

Las operaciones auxiliares de refino son necesarias para dar soporte al procesado de los hidrocarburos, algunas de éstas son la recuperación de residuos ligeros; la eliminación del agua amarga; el tratamiento y refrigeración de residuos sólidos, aguas residuales y agua de proceso; la producción de hidrógeno; la recuperación de azufre, y el tratamiento de gases ácidos y gas residual (Kraus, 1998).

Dentro de éstas Operaciones Auxiliares de refino, se encuentra el suministro y tratamiento de agua residual y de proceso, que son las operaciones de interés principal para el presente proyecto.

3.1.3 Consumo de agua en una refinería

El consumo de agua dentro de una refinería, suele ser generalmente del orden de miles de metros cúbicos al día. Sin embargo, la calidad del agua requerida dependerá del tipo de proceso o servicio al cual está destinada, pudiendo ser, por tanto, de calidades muy distintas y, en consecuencia, requerir o no de un tipo específico de pretratamiento antes del uso requerido.

El agua que requiere la refinería se puede obtener de fuentes naturales, del tratamiento de aguas residuales municipales o del agua de lluvia. En la siguiente figura se muestra un esquema general del consumo de agua en una refinería (Agüera, 2005).

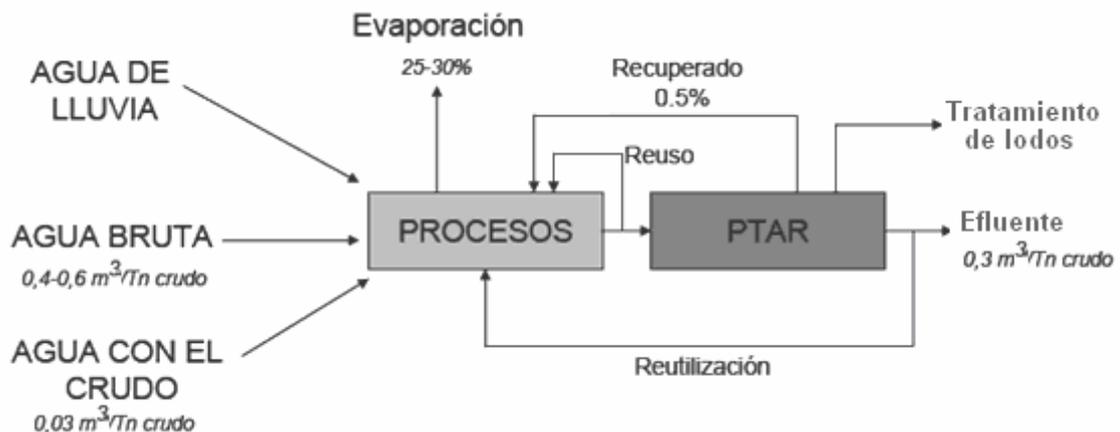


Figura 2. Usos del agua en una refinería

El consumo general de agua en una refinería abarca principalmente los siguientes aspectos:

- Agua potable para consumo humano.
- Agua para enfriamiento.
- Agua para proceso.
- Agua para contraincendio.
- Agua para desalado de crudo.
- Agua para generación de vapor.
- Agua para servicios generales.
- Agua para riego de áreas verdes.

La cantidad de agua requerida por las refinerías, varía dependiendo de la cantidad de procesos en actividad, de la capacidad de producción de dichos procesos y de las características de los productos generados (Baron, 2000). En la Tabla 1, se muestran las distribuciones porcentuales del uso del agua en algunas de las refinerías de México.

Tabla 3. Consumo de agua en algunas refinerías

REFINERÍA	Calderas %	Enfriamiento %	Proceso %	Servicios %	Otros %
ING. ANTONIO M. AMOR	17.8	50.0	23.0	7.0	2.2
GRAL. LÁZARO CÁRDENAS	13.8	67.9	17.7	0.5	0.1
FRANCISCO I. MADERO	14.4	52.6	11.9	21.0	0.1
ING. ANTONIO DAVALÍ JAIME	17.0	60.0	15.0	8.0	0
PROMEDIO	15.3	56.8	17.5	9.5	0.9

FUENTE: Reportes internos FQ (2008)

El índice de demanda de agua promedio en las refinerías de México es de 1.99 barriles de agua por cada barril de crudo, y en el caso de las descargas se considera que un índice de 0.96 a 0.99 barriles, representa un eficiente manejo del agua en la refinería. En la Tabla 2, se muestra la demanda y descarga de agua promedio de algunas refinerías.

Tabla 4. Índices de demanda y descarga promedio de agua.

Refinería	Demanda Barril Agua/ Barril de Crudo	Descarga Barril Agua/ Barril de Crudo
ING. ANTONIO M. AMOR	2.51	0.99
GRAL. LÁZARO CÁRDENAS	11.6	11.3
FRANCISCO I. MADERO	1.68	0.96

FUENTE: Reportes internos FQ (2008)

Al implementar las nuevas plantas del PCC, es de esperar, que la demanda de agua crezca, debido a que el número de procesos que requieren agua como servicio aumentará. Por tal motivo, en la implementación de estas nuevas plantas, es necesario aumentar el suministro

de agua a las refinerías, así como los procesos de tratamiento de las mismas, con la finalidad de satisfacer la calidad de agua exigida por cada proceso.

3.1.4 Reúso de agua tratada en una refinería

Actualmente, la disponibilidad del agua de primer uso (extraída de pozos) es cada vez menor, por lo que su costo va en aumento. Es por esto que resulta prácticamente imposible para la industria, solventar sus requerimientos de agua empleando únicamente agua de primer uso, la cual es también para el uso de las poblaciones aledañas a las industrias.

La calidad del agua requerida en una refinería es, como se mencionó, de diferentes calidades de agua, dependiendo del destino que tenga. En los casos en que se requiera un tratamiento previo antes de ser empleada en algún servicio o proceso, no es necesario el empleo de agua cruda obtenida de las fuentes naturales ya mencionadas. Es por ello que existe la posibilidad de reúso de agua dentro de muchas industrias, especialmente en la industria de la refinación, ya que en ella intervienen una gran variedad de procesos así como también de servicios requeridos.

La industria de la refinación ha buscado fuentes alternas de abastecimiento de agua, entre las que se encuentra el uso de sus propios efluentes procesados en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), en donde se deben tener operaciones de tratamiento específicas para el tipo de agua residual que es generada en una Refinería (agua con alto contenido de grasas, aceites, fenoles, sulfuros y otros contaminantes específicos), como son los procesos de separación de grasas y aceites en separadores API, CPI, etc., procesos de flotación por aire disuelto o inducido, entre otros.

No obstante, muchas industrias tratan sus aguas residuales para posteriormente descargarlas a ríos, al mar o a diversos cuerpos de agua. Esta vieja costumbre que está siendo erradicada, ya que era consecuencia de que algunas industrias se conformaban en cumplir normatividades y legislación en materia ambiental, sin considerar a fondo el posible empleo de agua tratada dentro de sus mismos procesos. Actualmente, la industria petroquímica y de refinación, está recuperando esta agua tratada, resultante generalmente de un tratamiento secundario, para ser empleada en torres de enfriamiento y alimentación a

plantas de desmineralización y posteriormente a calderas (Gioli, 1987), con pretratamientos como ultra filtración u ósmosis inversa previos al proceso de desmineralización (Shu-Hai, 1999; Teodosiu, 1999).

Para el tratamiento de agua residual industrial, se cuenta con diferentes procesos para purificar el agua, cada uno de los cuales es usado para remover contaminantes específicos. Esto es debido a que en materia de agua residual industrial no se puede hablar de un tren de tratamiento de agua en general, debido a que los contaminantes que pueda contener el agua residual industrial dependen totalmente del tipo de industrial del que procedan.

El tratamiento y reúso de los efluentes en una refinería, suele no ser suficiente para cubrir los requerimientos de agua de la misma, ya que siempre es necesario adicionar ciertas cantidades de agua para cubrir las pérdidas ocasionadas por la evaporación de agua en torres de enfriamiento, y por las purgas que son forzosamente requeridas para evitar acumulación de contaminantes en los sistemas. Además, existen tipos de agua que deben ser desechados totalmente, debido a que el tratamiento requerido para poder reutilizarla en alguno de los procesos o servicios de la refinería se torna considerablemente difícil.

Ante la dificultad de abastecerse con agua natural de ríos, lagos, pozos o de suministros del municipio, algunas industrias entre las que se encuentran la de refinación del petróleo, han optado por obtenerla para sus necesidades a partir del tratamiento de agua residual municipal, también conocida como agua negra.

La mayoría de las veces el agua obtenida del tratamiento convencional de aguas residuales municipales, no puede emplearse directamente en algún proceso de la refinería debido a la presencia de sólidos suspendidos y a una alta conductividad ocasionada generalmente por iones cloruro (Duyvesteijn, 1998), por lo que en estos casos el agua tratada pasa por tratamientos adicionales antes de ser enviada a procesos como el de desmineralización de agua para la generación de vapor.

En los siguientes apartados se presentan bases teóricas sobre el tratamiento de agua residual urbana. Se establecerán los principios de operación de los procesos propuestos para el tratamiento de agua residual urbana de las opciones propuestas de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

3.1.5 Plantas de tratamiento de agua residual

El tratamiento convencional de aguas residuales, especialmente las de tipo municipal se centra primordialmente en tres categorías: 1) primario, 2) secundario, y 3) terciario o avanzado. Este tratamiento de aguas residuales incluye el llamado pretratamiento, en donde se retiran los sólidos y gruesos de gran tamaño, así como las arenas y grasas que el agua residual puede contener.

Cada etapa de tratamiento suele estar constituida por los pasos u operaciones que se muestran en la figura 3 (Davis, 1998). Generalmente se presupone que al hablar de un nivel de tratamiento determinado, éste incluye los procesos de tratamiento previos, por ejemplo, cuando se habla de un tratamiento secundario, se presupone que este tratamiento incluye los procesos de pretratamiento y tratamiento primario.

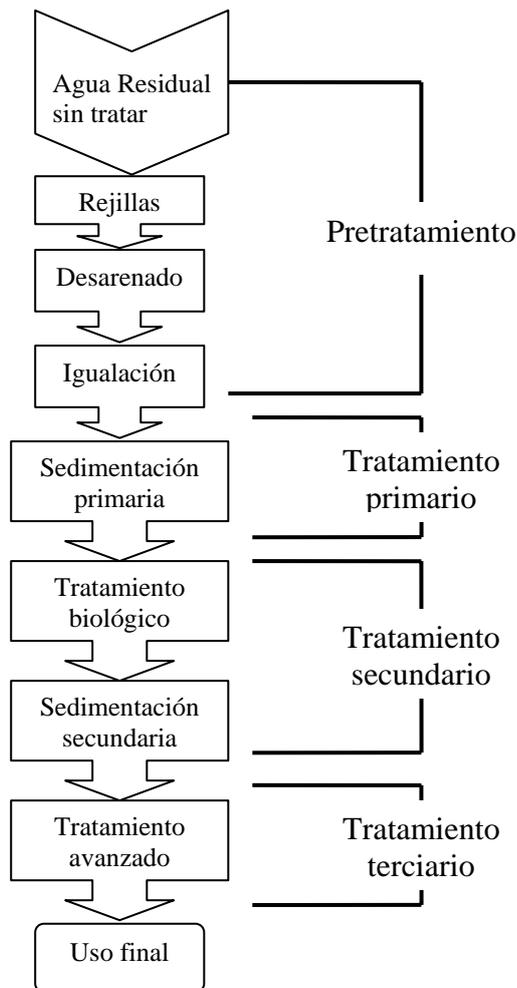


Figura 3. Grados de tratamiento del agua residual

El objetivo principal del pretratamiento o tratamiento previo, es proteger las instalaciones y equipos de la planta de tratamiento que le prosigue, como bombas, tuberías e instrumentos, entre otros.

Posteriormente el agua pasa al llamado tratamiento primario, donde se eliminan sólidos en suspensión fácilmente sedimentables, materia flotante y un poco de materia orgánica. Este tratamiento elimina generalmente el 60% de los sólidos suspendidos y aproximadamente el 35% de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), sin eliminar los contaminantes disueltos (Davis y Masten, 2005).

La materia orgánica que queda disuelta y en suspensión así como el resto de las partículas sólidas que no se han eliminado en los tratamientos anteriores, son eliminadas mediante los denominados “Procesos Biológicos de Tratamiento de Agua Residual”, que constituyen los llamados tratamientos secundarios. Los tratamientos biológicos están diseñados de tal

manera que aceleran la descomposición natural de los contaminantes orgánicos biodegradables, en un tiempo relativamente corto. Aunque estos procesos pueden eliminar más del 85% de la DBO y sólidos suspendidos, no eliminan cantidades importantes de sales o metales pesados, ni eliminan completamente las bacterias y los virus patógenos. El nitrógeno y fósforo no son eliminados eficientemente en sistemas secundarios convencionales, pero se pueden emplear tratamientos secundarios más complejos para efectuar su remoción.

Dentro del conjunto de estos procesos biológicos se pueden definir los “Procesos Biológicos de Depuración Aerobia”, como aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias) que en presencia de Oxígeno actúan sobre la materia orgánica suspendida y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular que puede separarse fácilmente mediante sedimentación. La mezcla de materia orgánica, bacterias y algunas otras sustancias, forma los llamados flóculos y el conjunto de flóculos es lo que se conoce comúnmente como lodos activados o lodos biológicos.

Este tipo de tratamientos busca la transformación de la materia orgánica contaminante, además de la coagulación y eliminación de los sólidos coloidales. En algunos casos, también se persigue la eliminación de nitrógeno y de fósforo. Finalmente, se consigue además una disminución de los microorganismos patógenos y fecales presentes en el agua residual.

Cuando las concentraciones residuales de los contaminantes presentes en el agua obtenida de tratamiento secundario, siguen siendo inadecuadas, se aplican procesos adicionales de tratamiento al efluente de tratamiento secundario, realizándose entonces tratamientos avanzados o de tipo terciario al agua residual. Estos tipos de tratamientos pueden consistir en tratamientos químicos, o procesos como la filtración, desinfección, ósmosis inversa, desmineralización, entre otros.

3.1.5.1 Procesos de tratamiento físico-químico

Los procesos u operaciones físicas, constituyen los primeros métodos empleados en el tratamiento de aguas residuales. Estos métodos dependen de las propiedades físicas de la impureza, como el tamaño de partícula, peso específico, viscosidad, etcétera (Tebbutt 1998). Algunas de estas operaciones y sus principales aplicaciones se muestran en la siguiente tabla (Metcalf & Eddy, 2003):

Tabla 5. Operaciones físicas empleadas en el tratamiento de aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003)

Operación	Aplicación
Cribado o desbaste	Eliminación de sólidos gruesos y sedimentables por intercepción mediante rejillas
Dilaceración	Trituración de sólidos gruesos hasta conseguir un tamaño uniforme
Homogenización	Regulación del flujo y de las cargas de DBO y sólidos en suspensión
Mezclado	Mezclado de reactivos químicos y gases con el agua residual para mantener los sólidos en suspensión
Floculación	Provoca la agregación de pequeñas partículas aumentando el tamaño de las mismas, para mejorar su eliminación por sedimentación por gravedad
Sedimentación	Eliminación de sólidos sedimentables y espesamiento de lodos
Flotación	Eliminación de sólidos en suspensión finamente divididos y de partículas con densidades menores y cercanas a la del agua
Filtración	Eliminación de sólidos finos en suspensión que restan tras el tratamiento biológico o químico
Microtamizado	Elimina algas procedentes de las lagunas de estabilización

Los procesos químicos, se utilizan generalmente junto con las operaciones físicas y con los procesos biológicos. Estos procesos dependen de las propiedades químicas de una impureza o que utilizan las propiedades químicas de reactivos agregados (Tebbutt 1998). Algunas de las aplicaciones de estos procesos se enlistan en la siguiente tabla (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 6. Procesos químicos empleados en el tratamiento de las aguas residuales (Metcalf & Eddy, 2003)

Operación	Aplicación
Precipitación química	Eliminación de fósforo y aumento de la eliminación de sólidos en suspensión en instalaciones de sedimentación primaria utilizadas en el tratamiento fisicoquímico
Transferencia de gases	Adición y eliminación de gases
Adsorción	Eliminación de materia orgánica no eliminada en los tratamientos químicos y biológicos. Descloración del agua residual.
Desinfección	Destrucción selectiva de microorganismos patógenos
Descloración	Eliminación del cloro combinado residual total remanente después de la cloración
Otros	Productos químicos utilizados con objetivos específicos en el tratamiento del agua residual

A continuación se presentan las características principales de operación de los procesos fisicoquímicos de tratamiento propuestos en el presente trabajo.

3.1.5.1.1 Cribado

Este proceso elimina sólidos gruesos y sedimentables por medio del uso de rejillas. En forma característica, los primeros dispositivos que encuentran las aguas residuales al entrar en la planta de tratamiento son las rejillas, cuyo principal objetivo es eliminar objetos grandes que pudiesen dañar o estorbar en bombas, válvulas y demás equipo mecánico. En las plantas modernas de tratamiento de aguas residuales, las rejillas se limpian de forma mecánica. El material sólido se guarda en una tolva y se manda a un relleno sanitario a intervalos regulares. Las rejillas se pueden clasificar en tres tipos de rejillas, los cuales se muestran en la siguiente tabla (Davis, M.L, 1998).

Tabla 7. Rejas usadas en cribado

Tipo de reja	Abertura (mm)	Usos
Rejas de basura	40 a 150	Evitar que pasen a la planta objetos muy grandes como troncos.
Rejas de limpieza manual	25 a 50	Se usan con poca frecuencia, normalmente en canales de derivación.
Rejas de limpieza mecánica	5 a 40	Son las más usadas en plantas de tratamiento.

Las velocidades máximas de llegada en el canal van de 0.6 a 1.2 m/s. Independientemente del tipo de reja, se instalan dos canales en paralelo con rejas, para que una de ellas pueda salir de servicio para limpieza y reparación (Davis, M.L, 1998).

3.1.5.1.2 Desarenado

El desarenado tiene como objetivo eliminar partículas más pesadas que el agua, que no se hayan quedado retenidas en el desbaste, y que tienen un tamaño superior a 200 micras, sobre todo arenas, pero también otras sustancias como cáscaras, semillas, entre otras. Con este proceso se consiguen proteger los equipos de procesos posteriores contra la abrasión, atascos y sobrecargas.

Existen tres tipos de desarenadores fundamentales: desarenadores de flujo horizontal, desarenadores de flujo vertical y desarenadores de flujo inducido.

Los desarenadores de flujo horizontal son utilizados en instalaciones de baja capacidad y consisten en un ensanchamiento del canal del pretratamiento de forma que se reduzca la velocidad de flujo y decanten las partículas. Debe diseñarse con un canal paralelo para que este salga de servicio y se le de limpieza, la cual se realiza manualmente.

Los desarenadores de flujo vertical se diseñan mediante tanques que tienen una velocidad ascendente del agua, tal que permita la decantación de las arenas. Suelen ser depósitos tronco-cilíndricos con alimentación tangencial.

Los desarenadores de flujo inducido son de tipo rectangulares aireados. En estos equipos se inyecta aire, creando una corriente en espiral que permite la decantación de las arenas y la generación de una corriente de fondo. Aunado a esto, el aire provoca la separación de las materias orgánicas. De esta forma, dado que el depósito está aireado y se favorece la separación de la materia orgánica, se reduce la producción de malos olores.

La separación de las arenas puede ser manual o por medio de hidrociclones, esto se presenta en plantas de poca capacidad. En plantas mayores se instalan sistemas de separación mediante tornillos de arquímedes o mediante un clasificador alternativo de rastrillos o de vaivén. Estos dos últimos lavan las arenas y vuelven a disminuir su contenido de materia orgánica (Nemerow, 1977).

3.1.5.1.3 Ablandamiento químico: Coagulación y Floculación

La coagulación y floculación son procesos dentro de la etapa de ablandamiento químico o clarificación del agua. Ambos se pueden unificar como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flóculos, de tal forma que su peso específico supere al del agua y puedan precipitarse.

Mediante la coagulación se eliminan la turbiedad, el color y las bacterias de las aguas que se van a potabilizar. El objetivo de la coagulación es cambiar la carga superficial de las partículas para que se puedan adherir entre sí y formar partículas mayores que se asienten por gravedad. Ese cambio también necesario en el agua superficial porque la mayor parte de las partículas coloidales provienen de arcillas que tienen una carga superficial negativa.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido, los cuales modifica para que las partículas hagan contacto entre sí. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas, de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un floculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

El término coágulo se refiere a las reacciones 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 segundo. El coagulante es una sal metálica que reacciona con la alcalinidad del agua para producir un floculo insoluble de hidróxido del metal que incorpora a las partículas coloidales. Un coagulante tiene tres propiedades clave:

1. Un catión trivalente. Los coloides naturales tienen con mayor frecuencia carga negativa, por lo que necesitan cationes que neutralicen esa carga. Los cationes trivalentes son mucho más efectivos que los monovalentes o divalentes, como el sodio y calcio.
2. No toxicidad. Debido a que para producir agua potable el coagulante no debe ser tóxico.
3. Insoluble en el intervalo de pH neutro. Las altas concentraciones del coagulante en el agua tratada son indeseables. Por consiguiente, un coagulante suele ser insoluble a los valores deseados de pH.

Los dos coagulantes metálicos de mayor uso son aluminio (Al^{3+}) y hierro ferrico (Fe^{3+}) (Davis, M.L, 1998), ambos cumplen con los tres requisitos mencionados anteriormente.

Los factores, que pueden promover la coagulación-floculación, son el gradiente de velocidad, el tiempo, y el pH (Sawyer, 2001). El tiempo y el gradiente de velocidad son importantes, pues de ellas depende el aumento en la probabilidad de que las partículas se unan. Por otra parte el pH es un factor predominante en el retiro de coloides.

El mezclado o mezclado rápido como se le llama, es el proceso mediante el cual los reactivos se dispersan, uniforme y rápidamente, en el agua. Durante la coagulación, las reacciones químicas que se efectúan en el mezclado rápido forman precipitados, es por ello que el mezclado rápido es quizá, la operación física más importante que incide en la eficiencia de la dosis del coagulante. En la coagulación la reacción química se efectúa en menos de 0.1 s; en consecuencia, es imperativo que el mezclado sea tan instantáneo y completo como sea posible.

El mezclado rápido puede efectuarse dentro de un tanque con un mezclador de eje vertical, o dentro de un tubo, usando sistemas especializados de mezcla.

Mientras que con el mezclado rápido se obtiene una buena mezcla del agua y el coagulante, la floculación proporciona las condiciones necesarias para un crecimiento óptimo de partícula, de modo que haya una buena sedimentación. El objetivo de la floculación es dejar que las partículas choquen y se adhieran entre sí, y que crezcan hasta llegar a un tamaño en el que se asiente con facilidad. El mezclado debe ser suficiente para que los choques tengan la energía suficiente para que las partículas se peguen entre sí. Por otra parte, demasiado mezclado puede rasgar las partículas (romperlas) y ser demasiado pequeñas para que la sedimentación sea buena. El principal parámetro de diseño en la floculación es el gradiente de velocidad, G . Este parámetro describe el grado de mezclado; mientras mayor sea el valor de G , más vigoroso será el mezclado (Davis, M. L., 1998).

Aunado a estos procesos se encuentra la sedimentación que es la separación de las partículas más pesadas que el agua, mediante la acción de la gravedad. Esta operación se aplica para la eliminación de partículas en el tanque de sedimentación, los cuales se usan después del ablandamiento químico para la eliminación de flóculos químicos y para la concentración de sólidos en los espesadores de lodos.

El proceso de sedimentación se basa en la diferencia en gravedad específica entre el material sedimentable y el agua, por lo que cualquier factor que afecte esta característica, afectará la velocidad de sedimentación.

El porcentaje de remoción de sólidos suspendidos es función de la carga hidráulica o superficial, (SOR, por sus siglas en inglés, Surface Overflow Rate), la cual se expresa como el flujo medio diario de aguas residuales, dividido entre el área superficial del sedimentador (WEF MOP-8, 1992; Metcalf & Eddy, 2003).

3.1.5.1.4 Filtros de arena

La filtración es un proceso mediante el cual el agua fluye lentamente atravesando un lecho de medios granulares, que suelen ser arena, carbón de antracita o granate. Cuando el agua atraviesa el medio, las partículas quedan atrapadas debido a varios mecanismos: intercepción, floculación, colado y sedimentación. Las partículas más densas son retenidas como en un colador. Esas partículas simplemente son demasiado grandes para pasar por

los poros del medio, y quedan atrapadas en las capas superiores del filtro (suponiendo que el flujo sea de arriba a abajo). Las partículas que fluyen a una velocidad suficientemente bajas son “interseptadas” y fijadas al medio filtrante por débiles fuerzas electrostáticas. Si el agua se trata químicamente antes de filtrarla puede haber floculación adicional, lo que permite que las partículas crezcan, de modo que las mayores se pueden eliminar por los demás mecanismos. Las aguas negras pueden ser pretratadas en un tanque séptico. El efluente del tanque séptico se distribuye después uniformemente sobre la superficie de la arena (Lesikar, Univ. Texas, 2008).

A medida que se llenan los espacios de los poros con partículas, aumenta la velocidad del agua, por lo que algunas partículas se deforman y traspasan el medio. Entonces, esas partículas fluyen sólo para ser atrapadas a mayor profundidad en el filtro. Una vez llenos los espacios de los poros hasta cierta capacidad, el color de la turbiedad rebasa el valor crítico y el lecho filtrante se debe retrolavar. También, a medida que aumenta el llenado de poros con partículas, la caída de presión a través del filtro continúa aumentando, lo que torna cada vez más difícil que el agua pase por el filtro.

Los filtros de arena son lechos o camas de material granular o arena y drenados o escurridos por debajo, para que las aguas negras pretratadas puedan ser tratadas, recogidas y distribuidas por el sistema de aplicación al suelo. Los filtros de arena pueden funcionar como lentos o rápidos. Los filtros lentos de arena usan, en forma convencional, sólo arena (con una capa de soporte de grava), pero los rápidos usan diversos medios. Las camas de un medio sólo usan arena, pero las de medios duales usan arena y antracita. Los lechos medios mezclados usan carbón, arena y granate.

Los filtros rápidos de arena tienen estratos de arena en el lecho. La distribución de los tamaños del grano se seleccionan para mejorar el paso del agua y minimizar al mismo tiempo el paso de partículas de materia. Estos filtros se limpian en el lugar forzando una corriente de agua inversa al flujo normal de operación que atraviese la arena. Esta operación se llama retrolavado o lavado (en sentido) inverso (Davis, M. L., 1998).

3.1.5.1.5 Unidades de adsorción por carbón activado

Este proceso se lleva a cabo por adsorción, que es un proceso en el cual las impurezas se adhieren a la superficie del carbón activado. La adherencia es gobernada por una atracción electro-química. El carbón activado es preparado a partir de diversos materiales, tales como, carbón, madera, cáscaras de nueces, turba y petróleo. El carbón se transforma en "activado" cuando se calienta a altas temperaturas (800 a 1000 °C) en la ausencia de oxígeno. El resultado es la creación de millones de poros microscópicos en la superficie del carbón. Esta enorme área superficial proporciona grandes oportunidades para que se dé el proceso de adsorción. El carbón activado tiene una fuerte atracción adsorptiva para otras moléculas (orgánicas), basadas en el carbono, y es excelente en retener firmemente moléculas más pesadas tales como compuestos orgánicos aromáticos.

Las unidades de adsorción de carbón activado remueven los compuestos orgánicos volátiles (COV), los plaguicidas y herbicidas, los compuestos con trihalometanos, radón, los solventes y otros productos hechos por el hombre y que encontramos en las aguas (Excel Water, 2007).

El carbón activado se emplea con más frecuencia para eliminar compuestos causantes de sabores y olores, así como algunos compuestos orgánicos sintéticos. La desventaja principal del carbón activado es que los compuestos problemáticos no se destruyen, sino que sólo se transfieren de un medio, el agua, a una matriz, la superficie del carbón. Además, cuando se utiliza para eliminar compuestos no polares, un filtro de carbón activado granular suele durar de 90 a 120 días antes de perder su capacidad de adsorción. Debido a su corta vida, el carbón activado granular necesita regenerarse. La regeneración se puede hacer calentándolo a unos 900°C para expulsar las sustancias orgánicas adsorbidas (Davis, M. L., 1998).

3.1.5.1.6 Suavización

La dureza se define como la suma de los cationes polivalentes (en unidades consistentes). Las unidades acostumbradas para expresarla son miligramos por litro (mg/L) de CaCO_3 . Aunque todos los cationes polivalentes contribuyen a la dureza, los principales son los del calcio y magnesio.

La suavización se lleva a cabo en agua que contiene una alta dureza, esto es que contiene una gran cantidad de iones calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}). El agua pasa a través de una columna que contiene una resina de intercambio ácido de catión en forma de sodio (Na^+) (por ejemplo, los cationes intercambiables son sodio). Los iones de calcio y magnesio son intercambiados por un número equivalente de iones de sodio.

El intercambio iónico se puede definir como el intercambio reversible de un ion en una fase sólida y un ion de carga igual en una fase acuosa. La forma más general de una reacción de intercambio iónico es



En donde se debe hacer notar que en esta reacción se intercambia una cantidad equivalente de iones. Cuando se ha saturado la resina, ya no se eliminará más dureza. En este punto se dice que hay penetración, pues los iones de dureza atraviesan el adsorbedor de intercambio iónico. Cuando la concentración de dureza en el flujo de salida rebasa un valor predeterminado, es señal de que a habido penetración (Davis, M. L., 1998).

La resina, una vez agotada, (por ejemplo, todos los iones de sodio disponible han sido intercambiados) debe ser recargada. Esto significa que hay que pasar una solución que contiene una alta concentración de sales de sodio tales como una salmuera de cloruro de sodio, a través de la resina de intercambio, este proceso es conocido como regeneración (Excel Water, 2007).

Ya que la resina elimina virtualmente 100% de la dureza, es necesario desviar una parte del agua para mezclarla después y obtener la dureza final deseada (Davis, M. L., 1998).

3.1.5.1.7 Ultrafiltración

Puede emplearse para eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes (0,01 mm). Se utiliza la Ultrafiltración (UF) cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales (incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos). Estos sistemas, capaces de eliminar bacterias y virus se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de nanofiltración, hiperfiltración u ósmosis inversa. Puesto que los coloides se eliminan, el agua tratada debe tener una turbidez prácticamente nula.

Se le considera como un método de filtración de flujo transversal, similar a la ósmosis inversa (OI) pero con presiones más bajas, que utiliza una membrana para separar partículas coloidales pequeñas y moléculas grandes del agua y otros líquidos. Situada entre la OI y la microfiltración en lo que se refiere al tamaño de partículas que se eliminan, la UF típicamente filtra partículas entre 0.001 a 0.1 micras (μm) y rechaza sustancias orgánicas de peso molecular mayor que 1,000 una mientras que deja pasar iones y sustancias orgánicas menores.

Una membrana es una película que permite el paso selectivo de sustancias a través de ella. El flujo de éstas sustancias puede estar determinada por diferentes "fuerzas impulsoras", principalmente: la presión, concentración y potencial eléctrico (Quero, 2007). La selectividad permitirá enriquecer o empobrecer una corriente o carga en una o varias sustancias, lo anterior se ilustra en la figura 4 (Quero, 2007).

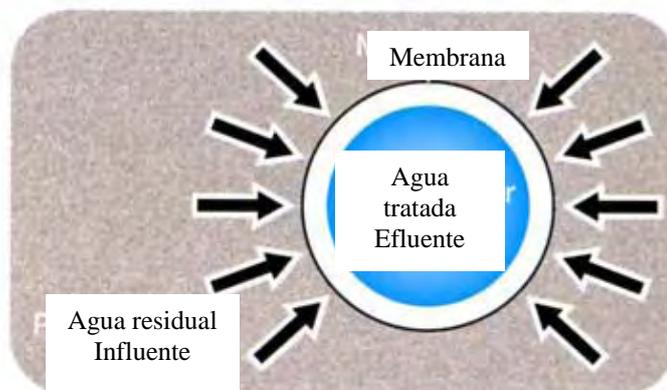


Figura 4. Diagrama básico de un proceso de separación de membranas

La selectividad de una membrana frente a una sustancia puede darse por dos factores distintos dependiendo de cómo describamos la membrana:

- **Tamaño:** La membrana consta de poros, las sustancias con moléculas más grandes que el tamaño de estos poros no podrán pasar a través de la membrana.
- **Afinidad química:** Si una sustancia se incorpora fácilmente a la membrana podrá atravesarla, en caso contrario no será posible el proceso.

3.1.5.1.8 Ósmosis Inversa

La ósmosis inversa es quizá uno de los procesos más sofisticados de depuración de agua y se aplica sobre todo a la obtención de agua dulce a partir de agua salada.

La ósmosis inversa consiste en invertir el proceso natural de ósmosis mediante la aplicación de una presión hidrostática superior a la presión osmótica de una disolución, obligando a una parte del disolvente a atravesar una membrana semipermeable, de tal forma que las impurezas y sales quedan en la parte más concentrada.

Las membranas de ósmosis inversa retienen del 90 al 99% de todos los elementos minerales disueltos, del 95 al 99% de la mayoría de los elementos orgánicos, y el 100% de las materias coloidales más finas (bacterias, virus, sílice). El resultado obtenido es un agua con muy pocas sales disueltas, apta para el consumo humano y animal, así como para el riego y la industria, o como base de tratamientos posteriores más sofisticados.

En diagrama siguiente se muestra un diagrama general del funcionamiento de la ósmosis inversa (Quero, 2007).

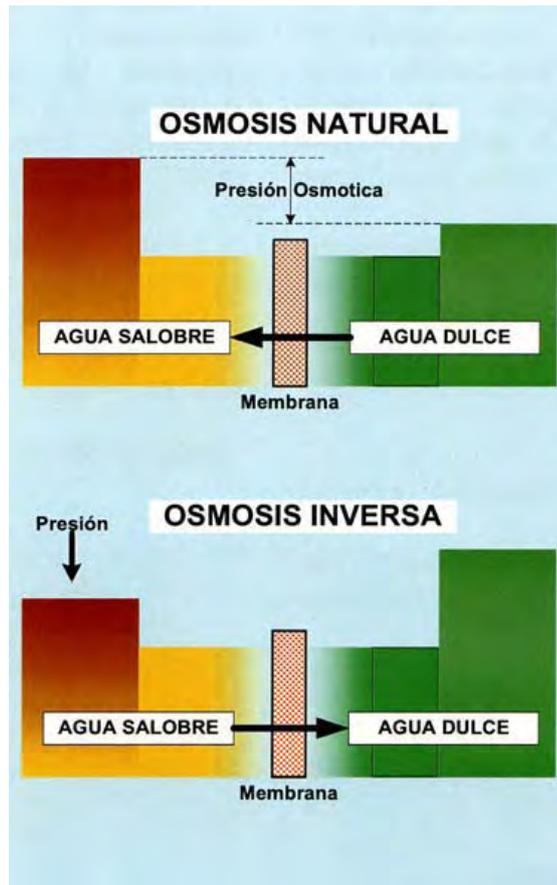


Figura 5. Diagrama básico de separación por ósmosis

La figura 6 muestra una clasificación general de los procesos arriba descritos, promovidos por la presión y por el efecto conjunto presión/concentración, según las propiedades de las membranas utilizadas, especialmente del tamaño de poro (Quero, 2007).



Figura 6. Correlación de propiedades de membranas con intervalos de separación

Los equipos nuevos de ósmosis inversa contienen dispositivos de recuperación de energía, utilizan la presión y el flujo del rechazo bajando los costos y requisitos de energía (Nesicolaci, 2004).

Se deben tener en cuenta procesos de soporte o previos al Sistema de Ósmosis Inversa (SOI) como un proceso de dechloración, ya que el cloro daña las membranas de poliamida y de pulido o microfiltrado del agua para evitar que las partículas rasguen la membrana y asegurar la eficiencia del equipo.

Los dos factores más importantes que determinan el costo de la ósmosis inversa son: la eficiencia de la membrana y la energía utilizada. Esta tecnología es capaz de producir agua de alta calidad, sin embargo los costos y la recuperación del agua dependen de la calidad del agua de alimentación (Nesicolaci, 2004).

3.1.5.1.9 Cloración

En el tratamiento de agua, la desinfección se usa para matar los patógenos (microorganismos que producen enfermedades) presentes en el agua, que podrían causar enfermedades desde benignas hasta fatales. Existen cuatro categorías de patógenos entéricos humanos que normalmente son importantes: bacterias, virus, protozoarios y quistes de amiba. Una desinfección eficaz debe destruir los cuatro.

Cuando se utiliza bien, el cloro es efectivo y práctico. Tiene varias ventajas sobre otros desinfectantes. Como es duradero, proporciona un residuo en el sistema de distribución. Mata a los patógenos primero por medio de la pared celular y después destruye las enzimas dentro del citoplasma. No solo ha sido usado como desinfectante, sino también para controlar légamos (cienos) y algas, destruir compuestos causantes de malos sabores y olores, y oxidar al hierro, manganeso y sulfato de hidrógeno. La principal desventaja del cloro es la formación de subproductos clorados debido a su reacción con la materia orgánica natural así como a su falta de eficacia para inactivar los oocistos de *Cryptosporidium* (Davis, M. L., 1998).

La efectividad del cloro depende de varios factores, que incluyen:

- Dosis (concentración). La efectividad del cloro depende de una concentración suficientemente alta para que inactive los patógenos.
- Tiempo de contacto. El cloro debe estar en contacto físico con los patógenos durante suficiente tiempo para lograr su inactivación. El cloro no es un inactivador de los oocistos de *Cryptosporidium*.
- Turbiedad. La presencia de partículas (turbiedad) esconde al patógeno del desinfectante.
- Otras especies reactivas. La presencia de otras sustancias reactivas, como el amoniaco, puede consumir el desinfectante y así reducir la concentración disponible para la inactivación, y además producir sustancias tóxicas.
- pH. El cloro tiene eficacia máxima a valores de pH menores de 7.5.
- Temperatura del agua. A medida que aumenta la temperatura se incrementa la velocidad de desinfección; sin embargo, el cloro se vuelve menos estable.

En la cloración se emplea un proceso de desinfección en donde el cloro es utilizado como gas cloro o como compuestos químicos: hipocloritos de sodio y calcio, dióxido de cloro y cal clorada. El amplio uso del cloro se debe a su disponibilidad como gas, líquido y polvos; a su economía y a su fácil aplicación debido a sus solubilidades.

Básicamente existen dos tipos de dosificadores de cloro: aquellos que dosifican directamente el gas y los que lo dosifican mediante una solución concentrada de cloro en agua. La distancia mínima del equipo al punto de aplicación debe de ser 8 m para evitar problemas de corrosión en válvula y equipo. Los dosificadores de solución se localizan cercanos al punto de aplicación para evitar la pérdida de carga en la conducción (Horan, 1991).

Los tanques de cloro en servicio deben instalarse sobre básculas para la verificación de su contenido. Además, se debe contar con equipo e instalaciones de emergencia, así como con un detector de cloro que esté conectado a un sistema de alarma.

3.1.5.2 Procesos de tratamiento biológico

Los procesos de tratamiento biológico de aguas residuales, se dividen de acuerdo a la ruta de metabolismo empleada, en los siguientes tipos (Davis y Masten, 2005; Metcalf & Eddy, 2003):

- **Aerobios:** Son aquellos procesos en donde se tiene presencia de oxígeno molecular (O_2) en el medio donde se localizan los microorganismos responsables del tratamiento biológico, lo cual permite la oxidación por vía biológica de la materia orgánica presente en el agua residual.
- **Anaerobios:** Son aquellos procesos en donde hay ausencia de oxígeno molecular en el medio donde se desarrollan los microorganismos, produciéndose la degradación biológica de la materia orgánica presente en el agua residual por vías como la acidogénesis y metanogénesis.
- **Anóxicos:** Son procesos donde hay ausencia de oxígeno molecular, sin embargo, se encuentra oxígeno en forma de nitratos (NO_3^-) o nitritos (NO_2^-), el cual es empleado por los

microorganismos en sustitución del oxígeno molecular convirtiendo estos radicales en nitrógeno gas (N₂), produciéndose la denominada desnitrificación.

Existen además gran variedad de procesos donde se combinan los tres tipos mencionados, además de aquellos procesos donde los microorganismos realizan sus funciones metabólicas tanto en presencia como en ausencia de oxígeno molecular denominados procesos facultativos. A continuación se describe el proceso biológico de mayor importancia para el presente trabajo.

3.1.5.2.1 Proceso de lodos activados

El proceso de lodos activados es un sistema de tratamiento de aguas residuales en el que se mantiene un cultivo biológico formado por diversos microorganismos (principalmente bacterias), los cuales se agrupan en conglomeraciones conocidas como flóculos que se encuentran suspendidos mediante agitación en el agua residual a tratar. Estos microorganismos se alimentan de las sustancias que lleva el agua residual para obtener energía y generar más microorganismos, formando a su vez más flóculos, los cuales son partículas fácilmente sedimentables y que en conjunto constituyen los denominados lodos activados o biológicos.

Existen diversas variaciones del proceso de tratamiento de agua residual por lodos activados, entre los que se encuentran (WEF MOP-8, 1992; Metcalf & Eddy, 2003):

- Flujo pistón
- Mezcla completa
- Alimentación escalonada
- Aeración prolongada (aeración extendida)
- Canales de oxidación
- Contacto-estabilización
- Proceso de doble etapa
- Sistemas de oxígeno puro

Todos los procesos de lodos activados tienen, en común el contacto de aguas residuales con flóculos biológicos previamente formados en un tanque de aireación. El lodo activado consiste en una masa floculenta de microorganismos, materia orgánica muerta y materiales inorgánicos; tiene la propiedad de poseer una superficie altamente activa para la adsorción de materiales coloidales y suspendidos, a la cual debe su nombre de activado. El resultado final es una porción de materia orgánica, susceptible de descomposición biológica, convertida en compuestos inorgánicos y el resto, transformada en lodo activo adicional.

3.1.5.2.1 Principios de funcionamiento

En el proceso de lodos activados pueden distinguirse dos operaciones principales: la oxidación biológica y la separación sólido-líquido.

La primera tiene lugar en el denominado reactor biológico o tanque de aeración, donde se mantiene el cultivo biológico en contacto con el agua residual. El cultivo biológico denominado licor mezclado está formado por un gran número de microorganismos agrupados en flóculos junto con la materia orgánica y sustancias minerales que se encuentran en el agua residual. Dichos microorganismos transforman la materia orgánica mediante reacciones de oxidación biológica.

La población de microorganismos, a los que se suele asociar directamente con los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV), debe de mantenerse a un determinado nivel o concentración de Sólidos en Suspensión en el Licor Mezclado (SSLM), para alcanzar un equilibrio entre la carga orgánica a eliminar y la cantidad de microorganismos necesarios para que se elimine esta carga.

En esta fase del proceso que ocurre en el reactor biológico, es necesario un sistema de agitación y aeración, que introduzca en el agua residual el oxígeno necesario para la acción depuradora de las bacterias aerobias, y que además permita la homogenización del licor mezclado contenido en el reactor, permitiendo de esta forma que todo el sustrato (materia orgánica) se distribuya de manera uniforme entre los microorganismos presentes en el tanque y que por otro lado, se evite la sedimentación de los flóculos y el lodo en el fondo del reactor biológico. Para que la materia orgánica pueda ser suficientemente oxidada por la

acción de los microorganismos, se requiere que el agua residual permanezca un cierto tiempo dentro del reactor, para posteriormente pasar como licor mezclado al denominado sedimentador o clarificador secundario.

La segunda operación principal del proceso de lodos activados es la adsorción, por medio de la cual la de materia orgánica del agua residual es adsorbida en la superficie de los lodos activados. La porción de materia orgánica adsorbida, no oxidada ni utilizada en síntesis, es almacenada en el flóculo biológico. Cuando se ha usado la capacidad de almacenamiento total del lodo, el lodo deja de ser activo en el sentido adsortivo. La actividad se recupera solamente después de un período de aireación durante el cual el material orgánico se emplea en oxidación y síntesis. Este proceso de aireación con el propósito de restablecer la actividad y estimular la capacidad adsortiva se reconoce como estabilización del lodo.

Después del reactor biológico, el agua residual pasa como licor mezclado al sedimentados o clarificador secundario, en donde el agua con lodo se deja reposar, con lo cual los lodos floculados tienden a sedimentarse, consiguiéndose separar el agua clarificada de los lodos biológicos.

El agua clarificada constituye el efluente resultante del tratamiento secundario. Los lodos sedimentados en el fondo del clarificador son recirculados de nuevo al reactor biológico para mantener en el mismo una concentración suficiente de microorganismos. Una parte excedente de estos lodos se extrae del sistema y se envía hacia el tratamiento de lodos.

3.1.5.2.1.2 Lodos activados con aeración prolongada o aeración extendida

El proceso consiste en una trituración de los vertidos (agua residual), un largo período de aireación (1 a 3 días), precipitación final de los lodos y retorno de los lodos precipitados al tanque de aireación. No hay necesidad de sedimentación primaria o digestión de los lodos; pero el sistema de aireación debe ser amplio, para el período de aireación requerido. El proceso de oxidación total es particularmente útil en pequeñas instalaciones, puesto que no requiere una supervisión especial. Se producen pequeñas dificultades si los lodos flotan, aunque el periodo de retención es relativamente corto. De hecho, puesto que los sólidos que resultan en este proceso son principalmente bajos en compuestos volátiles y por lo tanto

altos en cenizas, por lo que la velocidad de precipitación es muy alta. El retorno de los lodos es continuo y muy rápido en comparación con la práctica normal de los lodos activados. Por el retorno de los lodos en una gran proporción (100 al 300 por 100 del caudal), el sistema se mantiene aeróbico en todo momento. La concentración de los sólidos en el líquido de mezcla después de un largo período, alcanza un alto nivel y una parte de los lodos puede eliminarse. La pequeña cantidad de lodos retirados se almacena y concentra hasta que se retiran en un camión u otros medios a una zona fuera de la planta.

El tratamiento aeróbico prolongado, aunque produce pocos lodos residuales, tiene la desventaja de requerir, aproximadamente, tres veces la cantidad de aire de las plantas convencionales de lodos activados y de dejar salir algunos flóculos en el efluente. Por otra parte necesita muy poco trabajo de mantenimiento y está bien preparado para las descargas súbitas de las operaciones industriales (Nesicolaci, 2004).

4 METODOLOGÍA

A continuación se mencionarán las actividades realizadas en el desarrollo del presente proyecto de manera general y en seguida se presentará la metodología elegida para llevar a cabo la evaluación de opciones.

Se recopilaron históricos sobre el consumo de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor, las calidades de agua demandadas por los servicios de la refinería y las calidades de agua entregada por la Planta de tratamiento de agua residual (PTAR) de la refinería Ing. Antonio M. Amor. De forma conjunta se realizaron visitas a la refinería Ing. Antonio M. Amor para obtener información sobre el estado y comportamiento operacional de las redes de suministro de agua de pozos y PTAR. En campo se realizó el seguimiento de las redes de suministro de agua, recabando información sobre las plantas a las que se suministra agua; además de lo anterior se realizaron entrevistas con los operadores de las TE.

A partir de estos datos se realizó el análisis estadístico de la información más relevante. Posteriormente se analizó esta información, encontrando dos tipos de suministros de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor. Con lo que procedió a determinar las unidades de consumo de agua actuales en la refinería, así como las corrientes de agua que se consideran irrecuperables.

Partiendo de los anteriores datos, se elaboró el balance de agua modal promedio de la refinería Ing. Antonio M. Amor, balance que se utilizó para la toma de dediciones posteriores. A partir de los históricos de calidades de agua de la red de suministro de pozos y de PTAR, se elaboraron estadísticos para su posterior análisis.

En base a lo anterior se definieron las calidades de agua requeridas para las operaciones de las plantas de proceso que actualmente operan y de las calidades de agua que requieren las futuras plantas de proceso del Proyecto de Calidad de Combustibles (PCC). También se establecieron los requerimientos de agua de las futuras plantas del PCC, para su implementación en el balance de agua de la refinería Ing. Antonio M. Amor.

Con base en lo anterior se determinó la cantidad del suministro de pozos que es posible sustituir con la implementación de un nuevo suministro de agua y planteándolo en el balance de agua de la refinería Ing. Antonio M. Amor, en el que se toma en consideración el flujo de la nueva fuente de suministro de agua y los futuros requerimientos de la refinería Ing. Antonio M. Amor.

A continuación se plantearon las posibles opciones de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor y se profundizó en cada uno de los aspectos de mayor relevancia de cada una de las opciones. Uno de los aspectos de mayor relevancia de las opciones es la calidad de agua que pueden ofrecer, por lo que basados en esto se plantearon diferentes opciones de tratamiento de agua correspondientes a cada una de las opciones de suministro de agua.

Basándose en los aspectos técnicos de cada opción, se realizaron corridas económicas para cada una de las opciones, usando como herramienta la hoja de cálculo en Excel que elaboró y que es usada por PEMEX-Refinación para la evaluación económica de equipos y/o proyectos de inversión.

Esta información, se complementó con información adicional en materia social, política y ambiental de cada una de las opciones, tales como inclinación política de las presidencias municipales de las ubicaciones de las opciones de suministro, las condiciones ambientales de cada opción y los impactos ambientales de cada una de las opciones, entre otras.

Una vez recopilada la información más relevante de cada una de las opciones, se implementó un método matricial para la evaluación de los aspectos más relevantes de cada una de las opciones, con la finalidad de proponer la opción de suministro de agua que ofrezca mayores ventajas a la refinería Ing. Antonio M. Amor. Este método fue elegido en base a la facilidad que ofrece en cuanto a la asignación de ponderaciones de los criterios de evaluación que se consideren más relevantes para el evaluador. De igual manera, este método de evaluación es aplicable a cualquier tipo de evaluación, ya sea de compra de equipos, elección de tecnologías o decisiones sobre proyectos de inversión.

Debido a la cantidad de información y criterios que se pueden aplicar a la evaluación de las opciones de suministro de agua propuestas, el método elegido presenta la posibilidad de evaluar cada uno de los criterios de relevancia de las opciones de una manera fácil de observar, entender y modificar; por lo que se tiene la ventaja de entender plenamente el proceso de evaluación que se lleva a cabo.

A continuación se presenta la metodología que se aplicó a la evaluación de opciones de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

4.1 Metodología para la evaluación de alternativas de inversión

El siguiente capítulo está basado en el trabajo desarrollado por el *Instituto Mexicano del Petróleo y Petróleos Mexicanos* sobre metodologías para la evaluación de alternativas tecnológicas de forma integral (IMP, 1998), en el cual se exponen ampliamente conceptos, principios y metodología para la evaluación de alternativas tecnológicas en la realización de proyectos de refinación del petróleo. Este capítulo se enfoca principalmente al aspecto conceptual del desarrollo de la metodología para la evaluación de alternativas tecnológicas, y que por su estructura se puede aplicar a un proyecto de tratamiento de aguas residuales, o en un momento dado a cualquier proyecto que enfrente la selección y evaluación de diferentes tecnologías de proceso.

En forma general se puede decir que el proceso de evaluación de alternativas tecnológicas en proyectos de inversión, consiste en una actividad que busca sistemáticamente identificar las características integrales que son relevantes y se asocian a los proyectos de inversión, cuyo objetivo es encontrar una opción que brinde el mejor balance entre los beneficios económicos, financieros, de la calidad de los servicios recibidos y de los compromisos contraídos por el otro.

4.2 Desarrollo de la metodología

El desarrollo de un modelo de evaluación para la evaluación de alternativas tecnológicas, puede realizarse con la ejecución de cuatro etapas principales:

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

Basados en el panorama ofrecido por la aplicación de un *enfoque de sistemas* a la ejecución y operación de un proyecto, representada en la Ilustración 7 (IMP, 1998), se pueden identificar los siguientes criterios de evaluación o *aspectos* como los denominan los autores:

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

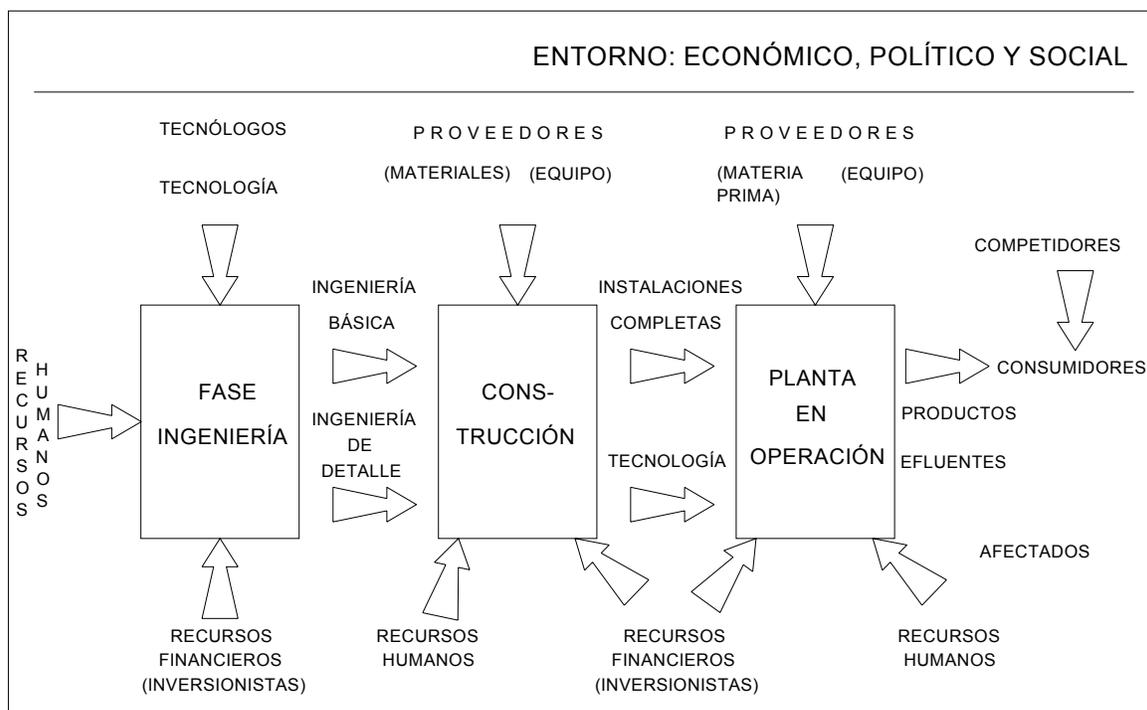


Figura 7. Visión ampliada de un proyecto

La selección de los anteriores aspectos incluye la mayoría de posibilidades que se pueden presentar en un proyecto de inversión, y permiten en gran medida la realización de una evaluación integral de las alternativas tecnológicas.

Dentro del establecimiento de una metodología de evaluación, los autores identifican como paso posterior, el desglose de cada uno de los aspectos identificados, en el cual se presentan y agrupan los criterios o *factores* que van a ser considerados (IMP, 1998). Lo siguiente es la descripción de los aspectos que se consideran en la metodología propuesta, al igual que los *subaspectos* y factores que cada aspecto evalúa:

4.2.1 Aspectos técnicos del proceso

Estos aspectos consideran las características de la tecnología desde el punto de vista de proceso, en el ámbito de ingeniería básica. Las diferencias entre los aspectos técnicos de varias tecnologías, tiene una alta repercusión sobre el comportamiento económico del proyecto, al igual que posibles efectos en el medio ambiente, lo que puede ofrecer ventajas competitivas que deben ser cuantificadas en la medida de lo posible. Los subaspectos y factores que contempla la evaluación de los aspectos técnicos son (IMP, 1998):

a. Concordancia del proceso con las bases de diseño

- Capacidad y factor de servicio
- Especificaciones de materias primas
- Especificaciones de productos
- Condiciones en límites de batería
- Disponibilidad de servicios auxiliares
- Consideraciones de diseño
- Flexibilidad

b. Características relevantes del proceso

- Esquema de proceso
- Equipo
- Condiciones de operación

- Rendimientos
 - Características especiales de los productos
 - Tratamientos necesarios previos o posteriores
 - Integración térmica
- c. Actualización del proceso (obsolescencia)**
- d. Flexibilidad del proceso**
- Materia prima
 - Capacidad de operación (caso crítico)
 - Número de equipos de relevo
 - Automatización
 - Efecto en la inversión y en los gastos de operación
- e. Consumo de materias primas**
- f. Consumo de servicios auxiliares**
- g. Consumo de químicos y catalizadores**
- h. Mano de obra requerida**
- Operación
 - Mantenimiento
 - Laboratorio
- i. Tratamiento de efluentes**
- Normas
 - Sistemas de tratamiento
- j. Impacto ecológico de la tecnología**
- k. Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad**

4.2.2 Aspectos técnicos complementarios

Dentro de estos aspectos se agrupan aquellos criterios que no hacen parte directa de las características de la tecnología, pero que tienen un efecto importante sobre el buen funcionamiento de la tecnología durante la operación de la planta. Se evalúan básicamente la experiencia de los diferentes tecnólogos, su capacidad organizacional, el tipo y alcance de los servicios que están ofertando, contenido del paquete de tecnología que se va a transferir

(ingeniería básica, ingeniería de detalle, etc.), entre otros que en algunas ocasiones pueden ser el factor dominante. Los subaspectos y factores que abarca la evaluación de los aspectos técnicos complementarios son:

a. Experiencia técnica-administrativa del licenciador

- Número, capacidad y fecha de plantas diseñadas, en operación y en construcción
- Número de plantas en fase de diseño
- Experiencia en fabricación de equipos especiales

b. Experiencia general de los licenciadores en ingeniería, en construcción, en operación, y en administración de proyectos

c. Información técnica

- Alcance del Paquete de Diseño de Proceso o el Paquete de Ingeniería Básica (dependerá de los servicios solicitados)
- Calidad de la información técnica suministrada

d. Servicios profesionales adicionales y experiencia

- Procura (nacional y en el extranjero)
- Supervisión de la expeditación y embarque (nacional y en el extranjero)
- Supervisión técnica durante la construcción
- Supervisión de la ingeniería de detalle
- Capacitación del personal
- Soporte de sistemas de control para la automatización del proceso
- Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación

e. Características generales

- Estructura organizacional
- Recursos materiales y humanos
- Disponibilidad de horas-hombre

f. Programas de trabajo de los servicios ofertados

- Paquete tecnológico
- Servicios profesionales adicionales

g. Certificación del sistema de aseguramiento de calidad

4.2.3 Aspectos económico-financieros

Estos aspectos permiten definir los niveles de recuperación de la inversión y las utilidades esperadas durante la operación de la planta. El sector inversionista privado hace mucho énfasis en dichos aspectos, considerándolos de vital importancia. Los subaspectos y factores que abarca la evaluación de los aspectos económico-financieros son:

a. Inversión en terreno, edificios, materiales y equipo

b. Capital de trabajo

c. Economía intrínseca del proceso

- Materias primas
- Productos
- Servicios auxiliares
- Catalizadores
- Reactivos químicos
- Mano de obra
- Depreciación

d. Costos y forma de pago de los servicios de ingeniería, licenciamiento y servicios profesionales adicionales

e. Parámetros de rentabilidad del proyecto

- Tasa interna de retorno (TIR)
- Valor presente neto (VPN)
- Flujo de efectivo descontado
- Relación beneficio/costo
- Valor Terminal
- Tasa de rendimiento promedio
- Periodo de retorno de la inversión

f. Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto a:

- Materia prima
- Precio del producto
- Inversión
- Nivel de producción (punto de equilibrio)
- Financiamiento externo

4.2.4 Aspectos contractuales

Estos aspectos agrupan aquellas características relacionadas con la transferencia de tecnología y los servicios ofertados por el tecnólogo, como lo son las obligaciones, derechos, restricciones, garantías, penalidades, etc. Estos aspectos contractuales pueden llegar dado el caso, a limitar la capacidad de realizar mejoras al proceso productivo en la etapa de operación, y a repercutir económicamente debido al nivel de regalías y la forma de pago de las mismas. Los autores proponen que se consideren los siguientes subaspectos y factores para el análisis:

a. Licencia y tecnología

- Obligaciones
- Derechos
- Restricciones
- Secrecía
- Derechos de patente
- Forma de pago
- Exclusividad (regional, nacional, internacional)
- Temporalidad

b. Garantía de la información técnica

- Tipo, nivel y calidad
- Fechas de entrega

c. Alcance de los servicios técnicos profesionales adicionales

- Capacitación del personal
- Responsabilidad del licenciador en la supervisión de la ingeniería de detalle
- Responsabilidad del licenciador en la supervisión de la construcción
- Criterios y procedimientos para pruebas de comportamiento de la planta

d. Garantías de funcionamiento del proceso

- Capacidad de la planta
- Consumo de materias primas
- Consumo de servicios auxiliares
- Consumo de agentes químicos

- Consumo de catalizadores
- Especificaciones de los productos
- Características de los efluentes
- Periodo de operación continua de la planta

e. Penalidades por incumplimientos

f. Confidencialidad de la información

g. Acceso a nuevos desarrollos

h. Leyes que rigen el contrato

4.2.5 Aspectos plausibles

En estos aspectos se agrupan criterios como los macro-económicos, sociales y ecológicos que pudieran llegar a influir en la evaluación de un proyecto de inversión. El término plausible se refiere la idea de que si los proyectos fueran evaluados bajo dichos parámetros (en donde se espera la percepción de beneficios sociales, macro-económicos, económicos, ambientales, etc.), serían *aplaudibles*.

a. Criterios de mercado

- Substitución de importaciones
- Demanda nueva
- Exportación

b. Criterios macro-económicos y sociales

- Beneficios regionales (descentralización, distribución del ingreso, uso de materias primas regionales, etc.)
- Generación de actividad económica
- Integración de proyectos a los planes nacionales (de desarrollo, tecnológicos, etc.)
- Generación de empleos
- Balanza de pagos

c. Criterios económico-financieros

- Inversión (tipo, origen, composición, magnitud)

- Insumos nacionales y valor agregado
- Rotación de capital (ventas/inversión total)
- Liquidez (capital de trabajo/inversión fija)
- Costeo incremental
- Relación producto-capital
- Ocupación por unidad de capital

d. Criterios tecnológicos

- Disponibilidad de la tecnología (nacional ó extranjera, número de tecnólogos, alternativas existentes, antigüedad de las patentes, etc.)
- Sensibilidad a la escala
- Características intrínsecas de la tecnología (potencial de adaptación, de asimilación, dependencia futura, grado de sofisticación)
- Impacto ecológico de la tecnología (contaminación, manejo de materiales tóxicos, carcinogénicos o peligrosos, aspectos eco-sociales, etc.)

4.2.6 Aspectos estratégico-tácticos

La inclusión de este aspecto es de gran importancia, ya que la tecnología que se adquiera debe ser congruente con la estrategia tecnológica del proyecto, y está a su vez con la estrategia general del negocio. En este grupo de criterios se incluyen a los tácticos, por tener un efecto en el buen desempeño del negocio, entre los que se pueden citar:

- a. Usar tecnologías de punta.** Representa la filosofía de usar únicamente tecnologías de punta, ya sea por prevenir una obsolescencia prematura, o por brindar una imagen de liderazgo en el campo.
- b. Usar tecnologías** que incluyan en la transferencia la ventaja comercial de participar en forma directa en ciertos mercados, ya sean nacionales o internacionales.
- c. Usar tecnologías que provengan de un tecnólogo con el que se hayan tenido o se tenga contacto anterior.** Este criterio refleja las ventajas que trae el negociar el monto de las regalías con un tecnólogo conocido, o aquellas que se desprenden de tener plantas de la misma tecnología, como es la aceleración en la curva de aprendizaje para

la nueva planta, reflejándose en posibles ahorros en el mantenimiento y reposición de equipo.

- d. **Usar tecnologías ofertadas como “llave en mano”**. Este criterio se refiere a la ventaja que se puede obtener del tecnólogo, cuando no se cuenta con el equipo necesario de expertos para poder integrar el paquete tecnológico, o que no se desee la dilución de responsabilidad cuando éste se esté desagregando.
- e. **Congruencia** de la tecnología con la estrategia tecnológica de la organización.

4.2.7 Aspectos normativos

Estos involucran la normatividad que puede regir un proyecto en sus diferentes fases. Estos aspectos tienen la característica de funcionar en la modalidad “cumple o no cumple”, pero no hay que olvidar que algunas alternativas cumplen en mayor medida mientras otras lo hacen escasamente. Entre éstos se encuentran:

- a. Leyes y reglamentos para compras del sector público
- b. Tratados de libre comercio convenidos por el país
- c. Leyes y reglamentos sobre propiedad industrial
- d. Reglamentos sobre higiene y seguridad
- e. Normas sobre el manejo de sustancias peligrosas
- f. Normas ecológicas y de protección al medio ambiente

Una vez que se han establecido los criterios específicos a ser tomados en cuenta para la evaluación de las tecnologías para el proyecto, se requiere establecer la metodología de evaluación, en donde se integren y califiquen dichos criterios. Es importante resaltar que la aplicación de la metodología debe ser realizada por personal especializado y multidisciplinario, con la formación profesional mínima en las áreas de procesos, ingeniería económica, ingeniería financiera, leyes y reglamentos (legales), y transferencia de tecnología.

4.3 Metodología de evaluación

La metodología propuesta toma como base la evaluación de los siete aspectos anteriormente mencionados, al igual que emplea criterios restrictivos que funcionan como *filtros*, que ayudan a la discriminación de las alternativas tecnológicas que se pretenden evaluar. El uso de la discriminación inicial en esta metodología ofrece la ventaja de ahorrar esfuerzos en el proceso de evaluación. Posterior a dicha discriminación inicial, se procede a una evaluación *económico-financiera* o a una *matricial*.

Esta metodología posee la flexibilidad necesaria para poder ser aplicada a cualquier tipo de proyecto de inversión, en el cual se involucre tecnologías u opciones de proceso. Adicionalmente, esta metodología permite la elección de la técnica de análisis y comparación de alternativas con base en el tipo de proyecto y en la información disponible. Se debe resaltar la gran flexibilidad que ofrece la metodología al ser considerada como una mezcla de técnicas *cuantitativas* y *cualitativas*. La metodología se puede representar esquemáticamente como se muestra en la figura 8 (IMP, 1998).

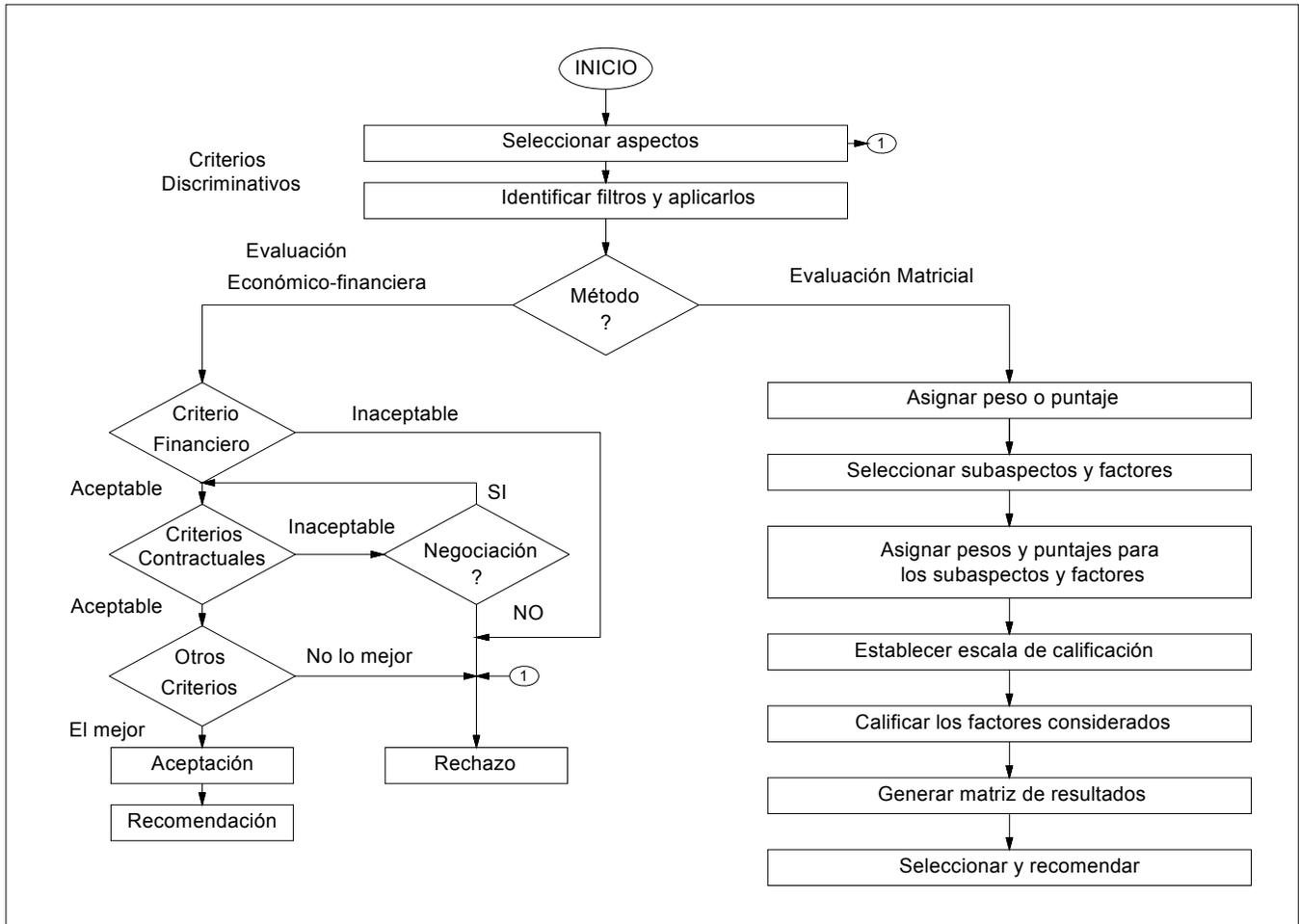


Figura 8. Metodología de evaluación de alternativas tecnológicas

En el anterior esquema se ve sintetizado el siguiente procedimiento:

a. Definición de los aspectos a considerar en la evaluación

En este paso se define los aspectos que pueden ser considerados dentro de la evaluación de las alternativas (A_i). Ver tabla 8 (IMP, 1998).

Tabla 8. Aspectos a considerar en la evaluación

ASPECTO (A_i)	DECISIÓN
1. Evaluación técnica del proceso	Si/No
2. Evaluación de aspectos técnicos complementarios	Si/No
3. Evaluación económico-financiera	Si/No
4. Evaluación contractual	Si/No
5. Evaluación de aspectos plausibles	Si/No
6. Evaluación de aspectos estratégico-tácticos	Si/No
7. Evaluación de aspectos normativos	Si/No

b. Identificación de los subaspectos o factores filtro

Dentro de los aspectos que se van a considerar, se identifican los subaspectos o factores que se van a usar como filtros. Estos criterios han de estar en congruencia con el alcance y naturaleza del proceso vinculado al proyecto. Se seleccionan tantos filtros como sea necesario. Como se menciona en el trabajo referenciado, estos filtros pueden ser obtenidos por *contrastación* (comparación), por *abstracción* (análisis de lo deseado), o por *imposición* (cumplimiento de directrices estratégicas o cumplimiento de la normatividad ambiental, legal, política, etc.)

c. Decisión del tipo de evaluación

Con base en la información disponible, se inclina por la utilización de un criterio económico-financiero como criterio discriminante para la evaluación. De no inclinar la evaluación hacia el aspecto económico-financiero, se ha de emplear la técnica matricial para la evaluación (punto f).

d. Discriminación de alternativas

Al escoger la técnica cuantitativa de la evaluación basada en el aspecto económico-financiero, se ha de tener en mente que las ventajas ofrecidas por las alternativas se puedan cuantificar, y que su efecto se refleja en el criterio seleccionado. Se establecen

en este punto los valores mínimo o máximo esperados para los criterios, y se procede a discriminar las alternativas tecnológicas que no cumplan con el criterio económico-financiero, para pasar al punto e. de la metodología.

e. Comparación de alternativas

En este punto se puede estar seguro de que las alternativas que han llegado hasta aquí, reúnen las características técnicas y económicas satisfactoriamente, por lo que se pasa a compararlas con aquellas que se está dispuesto a aceptar.

La información que hasta el momento se ha obtenido, permite decidir cuál de las alternativas es la más atractiva, además de cumplir con los requerimientos técnicos de proceso y contractuales solicitados. En los casos en que se presente similitud de conveniencia en todos los aspectos (económico, técnico y contractual), se recurre a la comparación de la experiencia del tecnólogo, que respalde cada propuesta (como número y capacidad de plantas en operación, en construcción, en diseño, años acumulados de operación de las plantas, etc.) o a factores plausibles. Con la ejecución de esta etapa se concluye la evaluación basada en parámetros económico-financieros. Por lo que los siguientes puntos se refieren a la metodología matricial.

f. Asignación del peso o puntaje de los aspectos

Si por el contrario, es más conveniente el empleo de la técnica matricial (que representa un método cualitativo), el paso a seguir es la asignación del peso o puntaje a cada uno de los aspectos considerados (P_i), en donde (basado en IMP, 1998):

$$100 = \sum P_i \quad (1)$$

g. Selección de los subaspectos y factores

Para cada aspecto seleccionado, se establecen los subaspectos (SA_i) y los factores (F_i) que van a ser evaluados. Un ejemplo de ello es el que se presenta en la tabla 9 (IMP, 1988).

Tabla 9. Ejemplo sobre elección de Aspectos: "evaluación técnica del proceso"

SUBASPECTO {(SAi)}	FACTORES (Fi)	DECISIÓN Si/No
a.1 CONCORDANCIA DEL PROCESO CON LAS BASES DE DISEÑO	- Capacidad y factor de servicio - Especificaciones de materias primas - Condiciones en límites de batería	Si
a.2 CARACTERÍSTICAS RELEVANTES DEL PROCESO	- Equipo - Condiciones de operación - Rendimientos - Características especiales de los productos	Si
a.3 ACTUALIZACIÓN DEL PROCESO	-Capacidad de modernización -Implementación de nuevas tecnologías	No
a.4 FLEXIBILIDAD DEL PROCESO	- Materia prima - Capacidad de operación - Número de equipo de relevo - Automatización - Efecto en la inversión y en gastos de operación	Si
a.5 CONSUMO DE MATERIAS PRIMAS, QUÍMICOS Y CATALIZADORES	-Cantidad de materias químicas requeridas -Capacidad de regeneración de catalizadores -Disponibilidad de químicos	Si
a.6 CONSUMO DE SERVICIOS AUXILIARES	- Vapor (baja, media, alta) - Electricidad - Agua de enfriamiento	No
a.7 MANO DE OBRA REQUERIDA	- Operación - Mantenimiento - Laboratorio	No
a.8 TRATAMIENTO DE EFLUENTES	- Normas - Sistemas de tratamiento	Si
a.9 IMPACTO ECOLÓGICO DE LA TECNOLOGÍA	-Tratamiento de desechos -Efluentes tóxicos -Emisión de gases	Si
a.10 RIESGOS IMPLÍCITOS EN LA TECNOLOGÍA	-Tiempo de vida -Facilidad de mantenimiento -Magnitud de fallas en equipos	No

h. Definición de pesos para subaspectos y factores

Esta asignación de los pesos o puntajes para los subaspectos y factores se realiza en forma de porcentaje y considerando que la suma debe ser cien (basado en IMP, 1998):

$$100 = \sum Wi \quad \text{Para los subaspectos considerados} \quad (2)$$

$$100 = \sum vi \quad \text{Para los factores considerados en cada subaspecto} \quad (3)$$

i. Establecimiento de la escala de calificación

En este punto se establecen la escala de calificación (C_i) y las características máximas y mínimas de los factores considerados. Una forma de calificación que facilita la diferenciación de los factores, es asignar calificaciones de 1 a 5 sin tomar en cuenta los valores 2 y 4 (escala propuesta por McConnell y Khalil, 1988), aunque existen ocasiones en que el emplear la escala completa representa una mejor opción. Un ejemplo de la escala propuesta se observa en la tabla 10 (IMP, 1988).

Tabla 10. Escala de calificación de atributos

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN (C_i)
Atributo no disponible	0
Calificación mínima (pobre en este atributo)	1
Calificación media (atributo promedio)	3
Calificación máxima (excelente en este atributo)	5

Se recomiendan los siguientes criterios para definir las calificaciones máxima y mínima:

- Usar como calificación máxima la mejor opción de las alternativas tecnológicas
- Usar como calificación mínima lo mínimo esperado, por ejemplo: la tasa interna de retorno (TIR)
- En algunos factores técnicos de proceso se puede usar el denominado *techo tecnológico*, es decir, el máximo valor reportado en la literatura especializada.

- Para algunos factores la máxima calificación puede ser establecida tomando en cuenta los servicios esperados, como por ejemplo: contenido del paquete de diseño de proceso (o paquete de ingeniería básica), garantías, etc.

-

- **Calificación de los factores**
- **Generación de la matriz de resultados**

En esta matriz se presentan los resultados de la evaluación, y se realizan los cálculos pertinentes para obtener la evaluación total de cada alternativa. Los cálculos a realizar se pueden representar con la siguiente ecuación (basado en IMP, 1998):

$$\text{Calificación total de la tecnología} = \sum_{k=1}^{nA} \frac{Pk}{100} \left[\sum_{j=1}^{nSAk} \frac{Wj}{100} \left(\sum_{i=1}^{nFj} Ci * \frac{vi}{mCi} \right) \right] \quad (4)$$

en donde:

- Pk = Porcentaje del aspecto k
- nA = Número de aspectos considerados
- $nSAk$ = Número de subaspectos considerados para cada aspecto k
- nFj = Número de factores considerados para cada subaspecto j
- Wj = Fracción del subaspecto j
- vi = Fracción del factor i
- Ci = Calificación del factor i
- mCi = Calificación máxima del factor i

j. Selección de la tecnología

Como paso final en la evaluación de las alternativas tecnológicas, se selecciona la tecnología que obtenga la mayor puntuación, y las dos inmediatas inferiores. Éstas deben ser priorizadas de mayor a menor y continuar con el proceso de negociación final.

5 CASO DE ESTUDIO: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La refinería Ing. Antonio M. Amor ha determinado de manera preliminar que debido al Proyecto de Calidad de Combustibles (PCC), se tendrán requerimientos adicionales de agua para servicios principales, cuyos suministros son difíciles de garantizar con la actual infraestructura. Por lo anterior se evaluarán opciones para cubrir las nuevas demandas de las plantas referentes al proyecto de Calidad de Combustibles, relativas tanto al consumo de agua de pozos, que es actualmente una fuente de suministro importante para la refinería Ing. Antonio M. Amor, como al planteamiento y descripción de opciones alternas que sean factibles a realizar según criterios técnicos, económicos y ambientales.

Con el fin de proponer a la refinería Ing. Antonio M. Amor la opción técnica, económica y ambiental más conveniente para el suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor, el grupo de ingeniería ambiental de la Facultad de química recopiló la información necesaria para definir distintas alternativas de suministro para cubrir las demandas de las plantas del proyecto de Combustibles Limpios, con el objetivo de reducir al máximo el consumo de agua cruda de pozos y optimizar el esquema actual de suministro de la misma. Para ello se efectuaron análisis comparativos considerando las alternativas planteadas, y se identificó en cada caso la factibilidad de su implementación.

5.1 Recopilación y análisis de información sobre los sistemas actuales de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor

Se analizó la información disponible proporcionada por la refinería Ing. Antonio M. Amor acerca de los suministros de agua actuales, dichos suministros comprenden el agua extraída de pozos y el agua residual tratada proveniente de la PTAR. El agua proporcionada por cada uno de estos suministros tiene una determinada calidad y en consecuencia el uso dado a cada tipo de agua es específico. A continuación se muestran los consumidores de los dos tipos de calidad de agua:

Tabla 1. Consumo de agua en refinería Ing. Antonio M. Amor

Suministro	Consumidores
Agua de pozos	UDA's, Torres de Enfriamiento, Proceso, Talleres, Áreas Administrativas, Colonias, Hospital.
Agua tratada en PTAR	Torres de Enfriamiento

Aunada a esta información, se debe tomar en cuenta las corrientes que se consideran irre recuperables para su consumo, que son las siguientes:

- Evaporación de Torres de enfriamiento.
- Usos varios (uso doméstico, mantenimiento, etc.)
- Pérdidas de vapor
- Fugas

Se analizaron los históricos de los flujos entregados por cada uno de los suministros de agua, con la finalidad de tener un panorama temporal de cómo han variado las necesidades de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor. En la figura siguiente se muestra el comportamiento del consumo de agua extraída de pozos y la proporcionada por la PTAR, dentro del periodo 2006-2007.

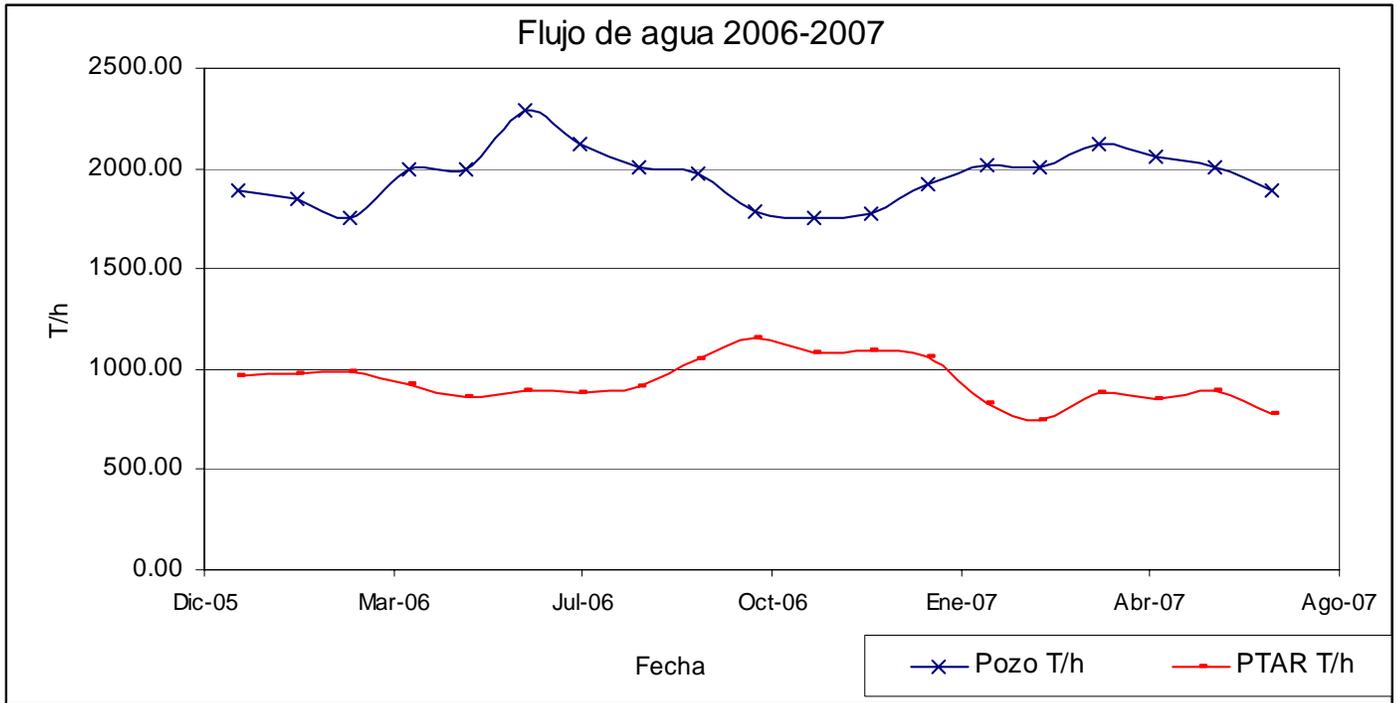


Figura 1. Consumo de agua extraída de pozos y de PTAR, periodo 2006-2007

Se le dio un tratamiento estadístico a los datos históricos proporcionados por la refinería Ing. Antonio M. Amor, los resultados arrojados se muestran en la tabla 12, estos datos se refieren a los flujos de agua procedentes de pozos y de PTAR, dentro de los periodos 2006-2007.

Tabla 2. Estadísticos de consumo de agua de pozos y agua residual tratada. Periodo 2006-2007.

	Agua de Pozo (T/h)	Agua Residual Tratada (T/h)
MODA	1,956.72	989.95
PROMEDIO	1,958.35	938.78
DESV. EST.	222.86	130.60
MEDIANA	1,946	918
MÁXIMO	2,615.38	1,296.00
MÍNIMO	1,343.50	684.00

El valor que se manejó para la realización del balance de consumo de agua en la refinería fue el de la Moda, debido a que en los históricos de consumo de agua de la refinería Ing. Antonio M. Amor aparecen ciertos valores de consumo extremos, ya sean demasiado bajos o demasiado altos. Estos valores corresponden a situaciones extremas de operación en las plantas y que distorsionan el valor promedio de sus consumos, por tal motivo el valor promedio

obtenido no refleja un consumo de agua de frecuencia constante. Es posible corregir ésta situación usando la moda, ya que usa los consumos de agua más frecuentes dentro del lapso de tiempo analizado, por lo que se obtiene un valor más representativo de la operación de la refinería a régimen permanente.

La refinería Ing. Antonio M. Amor presenta un consumo mayor de agua de pozos con un total aproximado de 1,956.72 T/h (543.53 L/s) en comparación con el consumo total de agua residual tratada de aproximadamente 989.95 T/h (274.99 L/s). Debido a que el consumo de agua de pozos de la refinería es mayor que el consumo de agua residual tratada por la PTAR, se buscará encontrar una opción de suministro de agua que permita sustituir o disminuir el consumo de agua de pozos y satisfacer los requerimientos de agua de las plantas de proceso que actualmente operan y de las futuras plantas del proyecto de Calidad de Combustibles, preferentemente con agua residual tratada.

Con base en la información recopilada de los históricos de consumo de agua mensual de la refinería Ing. Antonio M. Amor y la información obtenida en campo, se elaboró el balance de consumo de agua actual promedio, que se muestra en la figura 10.

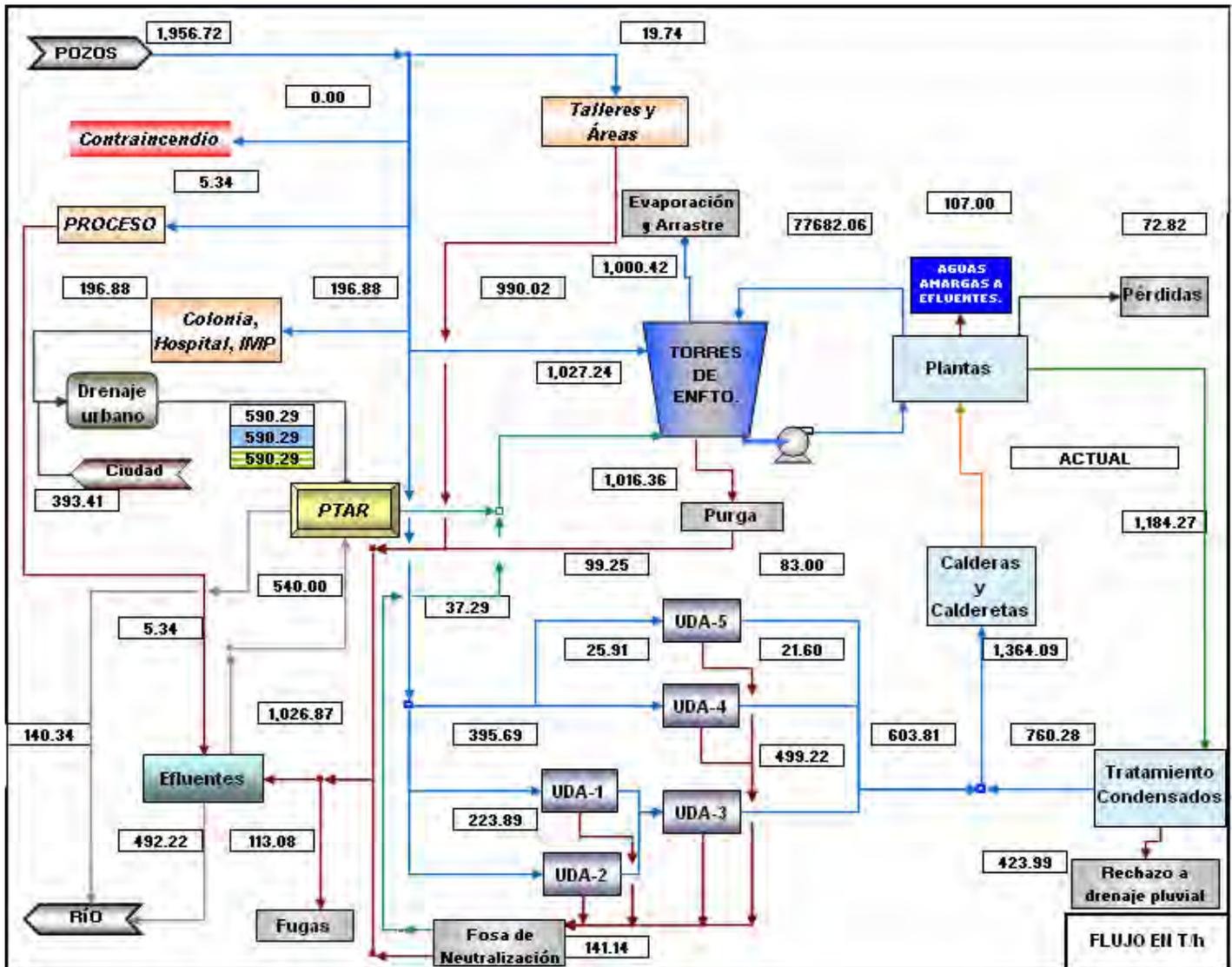


Figura 2. Balance de consumo actual de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor

Se usará este balance general de agua a lo largo de este trabajo, modificándolo según las exigencias de cada uno de los escenarios que se plantearán más adelante.

5.2 Calidades de agua de los sistemas actuales de suministro de la refinería Ing. Antonio M. Amor

Uno de los factores más importantes que se debe tomar en cuenta para este estudio, es la calidad de agua que actualmente está recibiendo la Refinería Ing. Antonio M. Amor (RIAMA), ya que se busca que la nueva opción de suministro tenga la misma o mayor calidad que la actual. A continuación se muestran los estadísticos de la calidad de agua proveniente de pozos para el periodo 2005 y 2006. Los estadísticos de periodos anteriores sobre calidades de agua extraída de pozos, no fueron entregados por la refinería Ing. Antonio M. Amor, debido a que no se encontraron disponibles.

Tabla 3. Estadísticos sobre calidad de agua de pozos. Período 2005

	pH (Unid. de pH)	Dureza Calcio (mg/L)	Dureza Total (mgCaCO ₃ /L)	Conductividad (μS/cm)	Alcalinidad (mgCaCO ₃ /L)	SiO ₂ (mg/L)	Cloruros (mg/L)
PROMEDIO	7.90	32.0	85	583	219	68.2	22.9
DESV. EST.	0.50	7.8	16	144	21.1	14.7	7.9
MEDIANA	8.00	30.0	84	600	220	70.0	23.0
MÁXIMO	8.80	100.0	232	900	280	160.0	40.0
MÍNIMO	0.30	10.0	12	6.5	10.0	0.7	5.0

Respecto a la tabla anterior, se observa que los parámetros tales como pH, cloruros y SiO₂, presentan valores relativamente bajos de desviación estándar respecto al valor promedio, entendiéndose por esto que los valores presentados a lo largo del tiempo no difieren mucho de su media o promedio.

Tabla 4. Estadísticos sobre calidad de agua de pozos. Período 2006

	pH (Unid. de pH)	D. Calcio (mg Ca/L)	D. Total (mg CaCO ₃ /L)	Conductividad (μS/cm)	Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	SiO ₂ (mg/L)	Cloruros (mg/L)
PROMEDIO	8.00	31.00	83.30	639	219	76.50	28.40
DESV. EST.	0.25	5.20	9.47	116	20.50	8.56	6.60
MEDIANA	8.08	30.00	84.00	631	220.00	77.9.0	30.00
MÁXIMO	8.70	56.00	124.00	950	340.00	113.00	50.00
MÍNIMO	5.00	20.00	41.00	170	10.00	37.00	5.00

Los datos estadísticos correspondientes a los años 2005 y 2006 no presentan en general grandes variaciones en los valores de la moda y de desviación estándar, lo que indica que la calidad del agua se ha mantenido prácticamente constante en ambos años.

La calidad de agua proveniente de la PTAR en los periodos 2004 y 2006, es la que se muestra en la tabla 15 y 16. No se proporcionaron datos más actuales por su inexistencia, respecto a la información del periodo 2005, no se entregó por la PTAR debido a que no estaban disponibles en los históricos de la planta.

Tabla 5. Estadísticos sobre calidad de agua de PTAR. Período 2004

	DBO (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Sólidos Suspendidos totales (mg/L)	SS (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)
PROMEDIO	111.99	32.25	42.60	2.18	14.70	8.38
DESV.ESTANDAR	45.97	33.25	26.00	7.17	11.22	4.01
MEDIANA	122.21	20.80	40.00	0.20	18.00	8.00
MÍNIMO	13.33	2.22	3.33	0.00	0.00	0.40
MÁXIMO	313.75	162.23	153.64	38.29	36.10	22.10

Tabla 6. Estadísticos sobre calidad de agua de PTAR. Período 2006

	DBO (mg/L)	Grasas y aceites (mg/L)	Sólidos Suspendidos totales (mg/L)	SS (mg/L)	Nitrógeno (mg/L)	Fósforo (mg/L)
PROMEDIO	108.26	9.36	45.30	0.18	8.65	6.06
DESV.ESTANDAR	25.67	4.23	22.18	0.27	3.67	5.16
MEDIANA	113.60	9.26	41.33	0.10	7.84	4.00
MÍNIMO	20.33	2.00	6.06	0.00	2.55	0.17
MÁXIMO	155.26	51.20	133.30	4.00	21.56	18.48

Por la desviación estándar que se presenta en los periodos, se puede decir que los valores han sido más constantes en el último periodo. Existen variaciones más visibles en la DBO y los SST, por lo que es recomendable ajustar los equipos de tratamiento biológico en la PTAR.

La tabla 17 muestra la calidad actual de agua que suministra la PTAR como agua de repuesto a torres de enfriamiento, así como la calidad de agua de repuesto proveniente de pozos, con

base en los análisis de calidad realizados por el laboratorio encargado del tratamiento del agua de las torres.

Tabla 7. Calidad promedio actual de agua de repuesto a Torres de Enfriamiento

Parámetro	Unidades	Agua (PTAR) 2004/2006	Agua de pozos 2005-2006
Grasas y aceites	mg/L	21.2	0
Fosfatos	mg/L	17.8	1.1
SST	mg/L	45.2	0.5
Sulfatos	mg/L	618	23
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	289	271
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	176	80
Dureza de calcio	mg CaCO ₃ /L	94	40
Cloruros	mg/L	203	34
Conductividad	µS/cm	2,574	650
SDT	mg/L	1,974	486
pH	Unidad de pH	7.3	7.9
Cloro residual	mg/L	0.5	0
Sílice	mg/L	112	75
Turbidez	NTU	1.5	0
Fenoles	mg/L	0.072	0
Nitrógeno	mg/L	5.09	0
Cobre	mg/L	0.11	0.02

Como se hace notar en la tabla 17, la calidad del agua de suministro de pozos es de mayor calidad que la alcanzada en la PTAR, de manera que es preferible su uso en TE. Esto también es aplicable para el caso de las UDA's ya que éstas unidades requieren una calidad de agua mayor a la exigida por las TE.

5.3 Costos de los sistemas actuales de suministro de agua a la refinería

Ing. Antonio M. Amor

Parte importante de este estudio es el aspecto económico, por lo que se realizó un tratamiento estadístico a los históricos referentes a los costos de consumo de agua de pozos y del agua residual tratada en la PTAR, dentro del periodo 2005-2007. Los resultados se muestran en la

tabla 18, en donde se tienen los costos de obtención de agua para cada uno de los suministros en moneda nacional por mes.

Tabla 8. Estadísticos sobre los costos totales referentes al consumo de agua de pozos y agua residual tratada. Periodo 2005-2006.

	Agua de Pozo (\$M.N.)/mes	Agua Residual Tratada (\$M.N.)/mes
PROMEDIO	10,307,521	1,140,355
DESV. EST.	1,119,378	338,886
MEDIANA	10,064,955	1,203,036
MÁXIMO	12,154,958	1,774,989
MÍNIMO	8,870,879	499,785

Se puede observar que el costo total asociado al agua de pozos es prácticamente 10 veces mayor al costo del agua PTAR, aunque en volumen se consumió poco menos del doble de agua de pozos respecto al agua PTAR. Esta gran diferencia en costos es más apreciable en la gráfica de costos que se muestra en la figura 11.

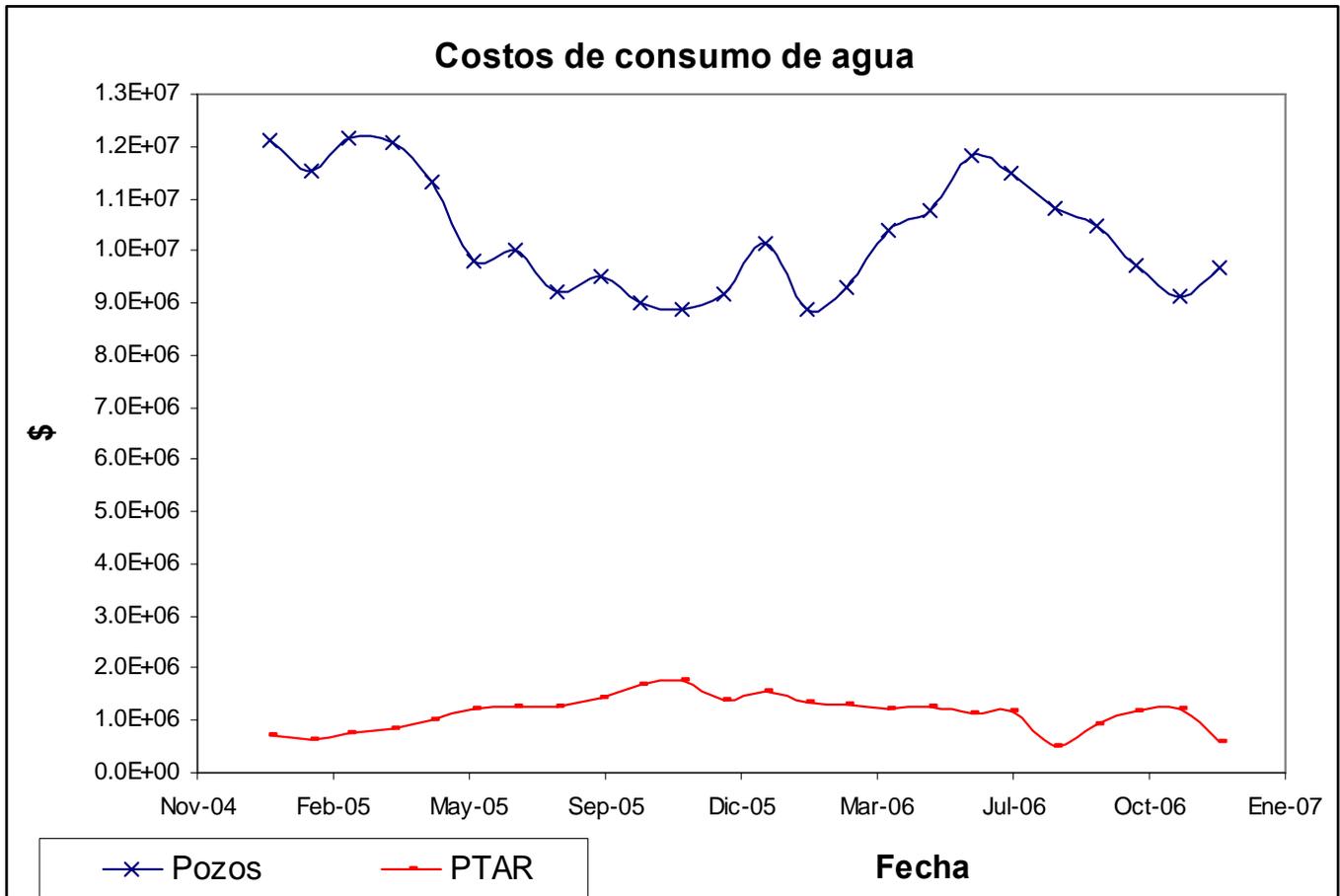


Figura 3. Costos totales del consumo de agua de pozos y agua de PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor (\$ M.N.). Periodo 2005 y 2007.

Debido al alto costo del agua extraída de pozos, se buscará disminuir el uso de este tipo de agua, ya que dicha disminución implicaría un ahorro económico considerable, aunando los beneficios ambientales asociados. De igual manera, se observa que el costo del tratamiento de agua en la PTAR de la refinería es relativamente mas bajo que el del agua extraída de pozos. Por tal razón se esperará incrementar el flujo entregado por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor.

5.4 Definición de los flujos y calidades de agua para las nuevas plantas de proceso

Para poder suministrar el flujo de agua requerido por las nuevas plantas del proyecto de calidad de combustible, es necesario que el agua suministrada cuente con una calidad que permita el óptimo funcionamiento de las TE y UDA's. Esto, debido a que previamente a la entrada del agua a las actuales plantas de proceso y a las plantas nuevas del PCC, el agua pasa por las TE y UDA's, por lo que la calidad que debe tener el agua es la que requieran estas unidades.

La tabla 19 muestra la calidad de agua requerida para el suministro a UDA's, la cual fue especificada por la refinería Ing. Antonio M. Amor. El suministro actual a UDA's es proveniente de los pozos, debido a que, como se mencionó anteriormente, el agua de pozos tiene una mayor calidad en comparación con la proveniente de la PTAR.

Tabla 9. Calidad requerida de agua a UDA's

Parámetro	Unidades	Promedio
pH		8
Conductividad	μS/cm	655
Dureza Total	mg CaCO ₃ /L	80
SiO ₂	mg/L	79
Alcalinidad Total	mg/L	250
Cloruros	mg/L	30
Dureza de Calcio	mg CaCO ₃ /L	44
Sólidos totales disueltos	mg/L	491

La tabla 20 muestra los límites máximos permisibles recomendados de acuerdo a literatura para la calidad de agua de repuesto a Torres de Enfriamiento (TE) (Rogozen, 1981; DGCOH, 1987; WPCF, 1990; EPA, 1999; Marwan, 2003).

Tabla 10. Límites máximos permisibles de calidad de agua de repuesto a Torres de Enfriamiento

Parámetro	WPFC (1990) (1)	EPA (1999) (2)	DGCOH (1987) (3)	EPRI (1981) (4)
Alcalinidad (mg CaCO ₃ /L)	350	-	300	-
Aluminio (mg/L)	0.1	-	1	<1
Bicarbonato (mg/L)	24	-	-	-
Calcio (mg/L)	50	-	-	-
Cloro residual (mg/L)	0	1	0.2	-
Cloruro (mg/L)	500	-	-	-
Colif. Fec. (org/100mL)	-	200	-	-
Colif. Tot. (org/100mL)	-	-	10,000	-
Conductividad (µS/cm)	-	-	-	-
DBO (mg/L)	25	30	20	-
DQO (mg/L)	75	-	75	-
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	650	-	325	-
Fosfatos (mg/L)	4	-	1	-
Hierro (mg/L)	0.5	-	0.5	<0.5
Magnesio (mg/L)	0.5	-	0	<0.5
Manganeso (mg/L)	0.5	-	0.5	-
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	1	-	0.5	<2
pH, unidades	6.9 - 9.0	6 – 9	5 – 8.3	7-9
SDT (mg/L)	500	-	1,200	-
Sílice (mg/L)	50	-	0	150
SST (mg/L)	100	30	500	<100
Sulfato (mg/L)	200	-	700	5000
Sulfuros (mg/L)	-	-	-	10
Turbidez (NTU)	50	-	10	-

Notas:

(1) WEF, Water Environment Federation

(2) EPA, Environmental Protection Agency

(3) DGCOH, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulicas

(4) EPRI, Electric Power Research Institute

Las celdas que contienen el símbolo -, señala los parámetros no especificados por cada una de las institución consultadas.

Una vez que se establecieron las calidades requeridas por las unidades a alimentar, se definen los flujos de agua que se debe alimentar a estas unidades, tomando en consideración los requerimientos de las plantas del PCC.

5.5 Definición de flujos para las nuevas plantas de Calidad de Combustibles

A la fecha de realización del presente estudio, la refinería Ing. Antonio M. Amor no cuenta con un suministro de agua de servicio suficiente para el correcto funcionamiento de las nuevas plantas, por lo que se deben buscar nuevas opciones de suministro de agua.

Con base en la última información emitida por PEMEX-Refinación, los servicios requeridos por el PCC se muestran en la tabla 21, la cual plantea los requerimientos de agua para las dos etapas del PCC.

Tabla 11. Requerimientos de agua de suministro del proyecto Calidad de Combustibles en sus dos etapas

PROYECTO CALIDAD DE COMBUSTIBLES		ETAPA GASOLINAS	ETAPA DIESEL	DOS ETAPAS
Requerimiento de agua de enfriamiento	GPM	1,858	357	2,215
Requerimiento de agua tratada (desmineralizada)	T/h	5.92	3.42	9.34

Estos requerimientos de agua fueron usados para calcular la cantidad de agua necesaria para suministrar a la refinería, debido a que estos flujos deben ser entregados por las TE y las UDA's, pero tomando en cuenta las eficiencias y maneras de operación de estos equipos, los flujos que se deben suministrar a las TE y UDA's difiere de los valores antes citados. Debido a esto, en la siguiente tabla se muestran los flujos de agua que se deben alimentar a las TE y a las UDA's para cubrir los requerimientos de las plantas del PCC.

Tabla 12. Requerimientos de suministro a refinería Ing. Antonio M. Amor considerando los requerimientos del PCC

PROYECTO CALIDAD DE COMBUSTIBLES			
Requerimiento de agua a UDA's	=	6.46	T/h
Repuesto de torres de enfriamiento	=	43.19	T/h

A continuación se implementaron estos requerimientos al balance de consumo de agua de la refinería Ing. Antonio M. Amor, reajustando dicho balance a las necesidades del PCC. En cuanto al planteamiento de sustitución del suministro de agua de pozos por agua proveniente de una PTAR o PTAN (Planta de Tratamiento de Aguas Negras), sólo es posible efectuarlo parcialmente, debido a que el agua extraída de pozos es también destinada como agua de uso doméstico, a talleres, áreas administrativas, proceso, colonias, hospital, entre otros, por lo que su suministro deberá seguir siendo el agua extraída de pozos. Esto debido a que las áreas antes mencionadas, exigen una calidad de agua muy alta, además de un flujo relativamente pequeño que no justifica la implementación de equipos de tratamiento de agua que otorguen dicha calidad de agua.

Sin embargo, el agua de pozos que es posible llegar a sustituir con agua de una PTAR o PTAN, es el agua de repuesto a Torres de Enfriamiento (TE) y el agua enviada a unidades desmineralizadoras de agua (UDA). Lo anterior bajo la condición de que se cumpla con las calidades requeridas por estas unidades.

En la figura 12 se muestra el balance de consumo de agua de la refinería Ing. Antonio M. Amor, considerando los requerimientos de las nuevas plantas del PCC, así como las consideraciones mencionadas en el párrafo anterior. En este se muestra el flujo que debe aportar la opción de suministro de agua que se elija.

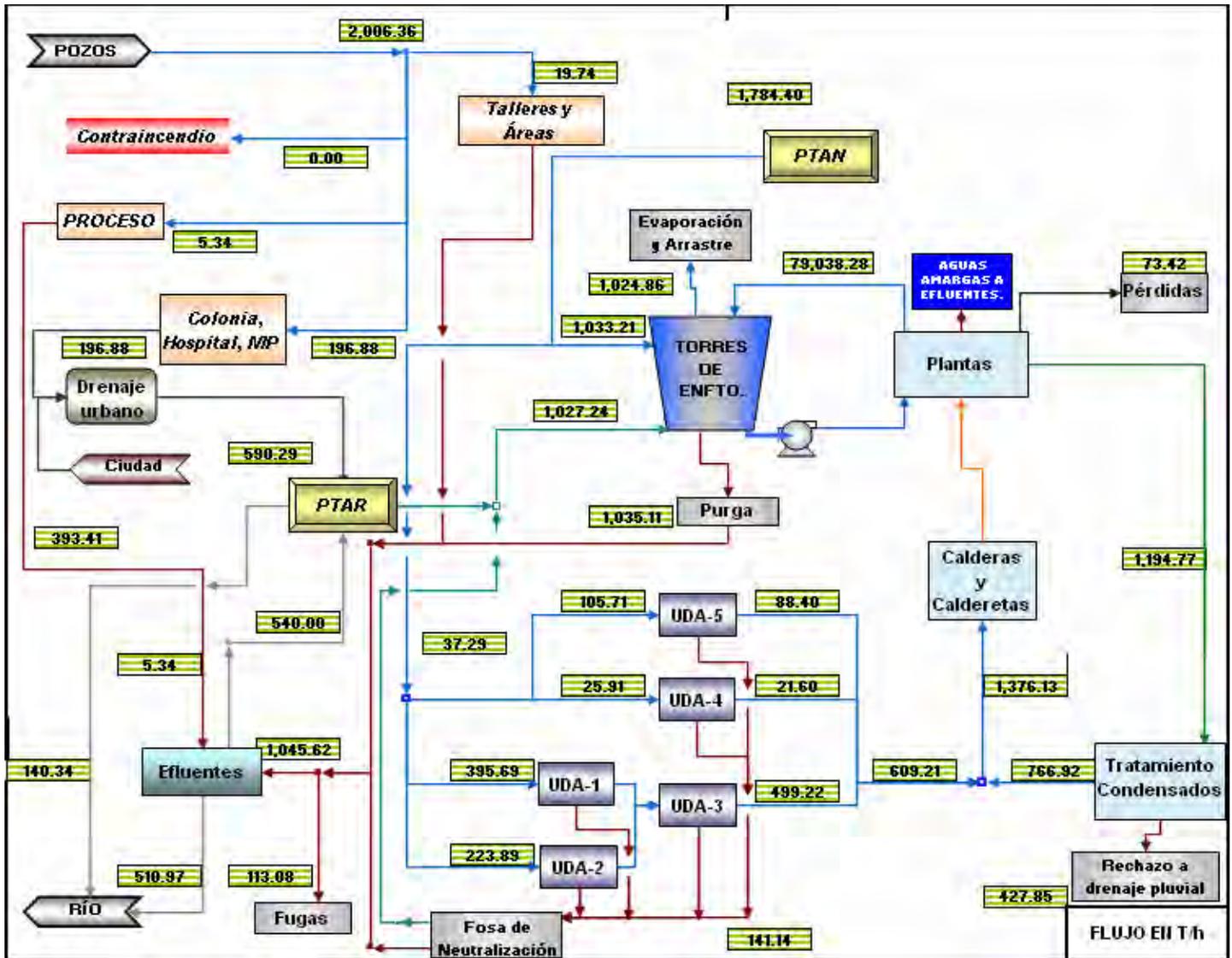


Figura 4. Balance de consumo de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor considerando el Proyecto Calidad de Combustibles

Debe señalarse que aunque el requerimiento de agua desmineralizada para el PCC sea de 5.4 T/h, el agua suministrada a las UDA's (unidades que producen el agua desmineralizada) es mayor, ya que la UDA 5 (unidad que producirá el agua desmineralizada necesaria para el PCC) no trabaja a una eficiencia de diseño, por lo que es necesario suministrar una cantidad de 6.46 T/h para que la UDA 5 produzca las 5.4 T/h requeridas por el PCC.

Se buscará alcanzar este balance de consumo de agua eligiendo la mejor opción como suministro de agua tratada que complemente al suministro proveniente de pozos.

5.6 Planteamiento y evaluación de opciones de suministro de agua para las nuevas plantas de proceso

Se plantearon diferentes opciones de suministro de agua factibles para evaluar cuál de ellas puede fungir como el nuevo suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor. De estas opciones se buscó primordialmente que cuenten con la capacidad suficiente para cubrir los flujos de agua exigidos actualmente y en un futuro por la refinería Ing. Antonio M. Amor , así como los requerimientos de calidad de agua requeridos por las TE y UDA´s.

Con estas opciones se planea sustituir el actual sistema de suministro de agua de pozos de la refinería Ing. Antonio M. Amor. Si se llevase a cabo una de las opciones propuestas de suministro de agua cruda a la refinería, debe establecerse que es necesario que el sistema de suministro de agua de pozos, es decir, los pozos de extracción de agua, así como su sistema de bombeo, se mantengan disponibles. Lo anterior es debido a que si bien se plantea sustituir el sistema de suministro de agua de pozos, este puede seguir actual como suministro de agua en caso de que por algún factor la propuesta elegida como nuevo suministro de agua no pudiese cumplir con los requerimientos establecidos.

Esta propuesta esta basada en el hecho de que el suministro de agua urbana para tratamiento no tiene un flujo o calidad constante, por lo que si se presentase el caso en el que no se pudiese suministrar el agua tratada a la refinería Ing. Antonio M. Amor, esta podrá operar normalmente con agua extraída de pozos. Por lo que la refinería Ing. Antonio M. Amor será capaz de operar bajo condiciones extremas de operación.

5.6.1 Consideraciones para disminuir el consumo de agua de pozo

Mensualmente se extraen en medio modal 544 L/s de agua de pozo, de los cuales 207 L/s son destinados a las unidades UDA´s; 275 L/s se utilizan como agua de repuesto a TE y los 62 L/s restantes son consumidos por talleres, áreas administrativas, proceso, colonias, IMP, y el hospital entre otros.

Como se mencionó con anterioridad, la fracción de agua proveniente de pozos que va a UDA's y TE se puede sustituir por agua de una PTAR o PTAN, mientras que la fracción de agua que va a proceso, colonias, hospital y talleres, seguirá siendo suministrada por agua de pozos.

Con base en lo anterior se requiere reemplazar los 482 L/s de agua de pozos que se envían actualmente a UDA's y a TE con un agua tratada que tenga la calidad suficiente para estos servicios. El proyecto de Calidad de Combustibles estima que se requieren 50 L/s de agua adicionales a los consumos actuales, la cual también puede ser suministrada con agua tratada de una PTAN ó PTAR. De esta forma se requieren finalmente 532 L/s de agua tratada, considerando que estos son valores promedio que pueden fluctuar y por lo tanto incrementarse, se estima un flujo total de aproximadamente 600 L/s de agua tratada, valorando futuros requerimientos. Por lo que se estima 350 L/s de agua de repuesto a TE y 250 L/s de agua para alimentación a UDA's.

La información mencionada anteriormente se presenta en la siguiente tabla, en ella se simplifican los requerimientos de agua de pozos que se van a sustituir con agua tratada de un nuevo suministro.

Tabla 13. Requerimientos de agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor

Suministro actual de agua de pozos	Requerimientos actuales de agua de pozos	Requerimientos a sustituir por agua tratada	Requerimientos PCC	Requerimiento total a sustituir	Flujo requerido considerando PCC y futuras expansiones
544 L/s	207 L/s UDA's,	482 L/s a UDA's	7 L/s UDA's	532 L/s de agua tratada	250 L/s UDA's
	275 L/s TE	y TE	43 L/s TE		350 L/s TE
	62 L/s talleres, áreas administrativas, proceso, colonias, hospital				

En la siguiente sección se presentaran las opciones propuestas a implementarse para cumplir con el escenario de suministro de agua anteriormente planteado en el balance de agua en el que se proyecta el requerimiento del PCC.

5.6.2 Opciones de sustitución de agua de pozos y de suministro de agua para las nuevas plantas del proyecto de Calidad de Combustibles

Con base en lo descrito anteriormente, se analizaron varias opciones, las más factibles para su realización se enlistan a continuación:

1. Sustitución de agua de pozos con agua tratada de la PTAN Irapuato
2. Sustitución de agua de pozos con agua negra de Celaya y una PTAN de la RIAMA
3. Sustitución de agua de pozos con agua tratada de una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero
4. Suministro de agua incrementando el agua tratada de la PTAR

Para las opciones 1 y 2, es muy importante la distancia y diferencia de altitud entre la fuente de suministro y la ubicación de la refinería Ing. Antonio M. Amor, ya que para dichas opciones el agua de suministro será de los municipios cercanos, en este caso Irapuato y Celaya, y no del municipio de Salamanca. Por otra parte, en la opción 3 y 4, referentes a la posible PTAN Salamanca construida por un tercero, estará ubicada en las cercanías de la refinería, y debido a que la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor se encuentra instalada dentro de los límites de la misma, en ambas opciones la distancia y diferencia de altitud no serán significativas como en los dos primeros casos. Haciendo uso de la herramienta *Google Earth*, se realizaron cálculos aproximados de las distancias, desde la fuente de suministro hasta la refinería Ing. Antonio M. Amor por trayectoria lineal y vía carretera, asimismo se obtuvieron los niveles de elevación sobre el nivel del mar (altitud) de estas regiones. Los datos se muestran en la tabla 24.

Tabla 14. Distancia y altura de las posibles nuevas opciones de suministro respecto a la refinería Ing. Antonio M. Amor

Municipio	Distancia Lineal (km)	Distancia vía Carretera (km)	Altura sobre el nivel del mar (m)	Diferencia en altitud con respecto a la refinería Ing. Antonio M. Amor Δh (m)
Salamanca	~0	~0	1,716	~ 0
Irapuato	20	24	1,718	2 a favor del flujo
Celaya	33	34	1,759	43 a favor del flujo

Como se observa en la tabla 24, la diferencia en altitud (Δh) entre los municipios de Irapuato y de Salamanca no es relevante. Por otra parte, la diferencia de altitud entre los municipios de Celaya y Salamanca es más significativa, pero debe tomarse en cuenta que el municipio de Celaya se encuentra por arriba de Salamanca, por lo que el flujo de agua puede ser ayudado por la gravedad. Sin embargo, al parecer está diferencia no es suficiente para considerar un envío por gravedad, debido a que la pendiente mínima recomendada para escurrimiento es de 0.5% (CEA, 2007), mientras que con base en los valores de la diferencia de altitud (Δh) y distancia de ambos municipios, la pendiente resultante para este caso es de 0.13%. En caso de que una de las dos primeras opciones sea la más factible y se elija, será necesario realizar una medición más exacta de las posibles rutas de instalación para la tubería.

Las corridas económicas para la evaluación de cada una de las opciones se llevaron a cabo en una hoja de cálculo de Excel, elaborada por PEMEX para la realización de evaluaciones económicas, ya sea de equipos o proyectos de inversión. Los datos alimentados a esta hoja de cálculo se estimaron a partir de diferentes fuentes de datos: de información sobre los costos de construcción y operación de las PTAN que operan en las diferentes refinerías de PEMEX; de cotizaciones realizadas anteriormente para PTAN's por el grupo de ingeniería ambiental de la Facultad de Química, cotizaciones de equipo y (Sulzer, 2007; Tuvansa, 2007) de estudios de cotizaciones de PTAN's de ámbito municipal. De estos datos se estimaron los costos para el periodo de tiempo (Banco de México, 2008) y capacidades requeridas por el presente proyecto (Randall, 2007).

Los resultados arrojados por la hoja de cálculo están expresados en USD, los cuales se calculan en base a una paridad establecida por PEMEX, esta paridad tiene un valor de 11.4. Debido a que la compra y venta de la tecnología y equipos industriales es manejada con mayor frecuencia en USD, los resultados de los análisis económicos serán presentados en este trabajo en dichas unidades monetarias. Los costos propuestos por la PTAN Irapuato y por la empresa privada al flujo de agua se presentan en moneda nacional, pues el precio original se planteo en estas unidades, sin embargo también se presentan en USD, usando la paridad antes mencionada para la obtención de estos valores.

Cabe mencionar que la hoja de cálculo de PEMEX proporciona dos análisis de sensibilidad, uno supone un incremento del 20% en el monto de la inversión y el segundo plantea un incremento en el lapso de construcción del 20% del tiempo estimado, estos resultados se reportaron y evaluaron, debido a que determinan cual de las opciones evaluadas son más estables.

En los siguientes apartados se desglosará cada una de las opciones de suministro de agua planteadas anteriormente.

5.6.2.1 Sustitución de agua de pozos con agua tratada de la PTAN Irapuato

Esta opción plantea la posibilidad de comprar agua tratada a la PTAN Irapuato, con un flujo estimado de 600 L/s. El escenario que se presenta en esta opción se muestra en la siguiente figura.

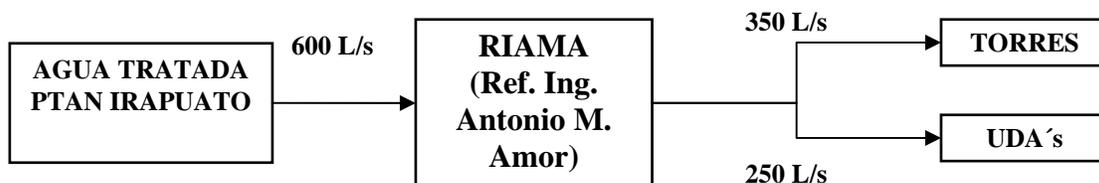


Figura 5. Suministro de agua por PTAN Irapuato.

La figura 14 muestra la trayectoria vía carretera como aproximación de la longitud de tubería requerida para el envío del agua tratada de la PTAN Irapuato a la refinería Ing. Antonio M. Amor (Google earth), esta ruta tiene una distancia de 24 km.



Figura 6. Recorrido vía carretera de PTAN Irapuato a RIAMA 24 km

La PTAN Irapuato cuenta con una capacidad de tratamiento de 700 L/s, por lo que es capaz de proporcionar el flujo requerido por la refinería Ing. Antonio M. Amor. La diferencia en altitud (Δh) entre los municipios de Irapuato y de Salamanca no es realmente relevante, debido a que tienen una pendiente de bombeo que ayudará al bombeo del líquido.

Se realizó la simulación en EPANET (desarrollado por la EPA para redes hidráulicas) de varios escenarios de manera general para estimar la capacidad de las bombas a utilizar para el envío de agua tratada de la PTAN Irapuato a la refinería Ing. Antonio M. Amor. A partir de estas simulaciones se plantea el uso de dos bombas de 20,000 GPM que dan 5 kg/cm² cada una de ellas. El arreglo se estimó con dos bombas en serie, la primera en la PTAN Irapuato y la segunda a la mitad del trayecto, con lo que el agua puede llegar con presión adecuada de operación a la refinería Ing. Antonio M. Amor. Dentro de esta simulación, también se llegó a la conclusión de que se deberá de usar una tubería de 24", debido a que ésta basta para el transporte de agua de la PTAN Irapuato a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

El proceso de tratamiento efectuado en la PTAN Irapuato se describe a continuación: El agua proveniente de un colector general ingresa a la planta el cual pasa por un sistema de cribado y posteriormente a los canales de desarenado, de ahí el agua es bombeada a un nivel superior donde se le realiza un cribado fino, en seguida el agua es enviada por gravedad a un sistema de sedimentación primaria y posteriormente a un tratamiento biológico en lagunas de estabilización de tipo facultativo, sin presencia de aereadores. Posteriormente el agua es clorada obteniendo agua tratada para riego de gramíneas (plantas que conforman la alimentación básica de los animales). De efluente se analiza la posibilidad de emplear para sustituir la extracción de agua de pozos en la refinería Ing. Antonio M. Amor.

Se analizaron estadísticamente los parámetros que determinan la calidad de agua que entra y sale de la PTAN Irapuato. Se compararon históricos de calidad de agua realizados por la misma PTAN Irapuato y por un Laboratorio externo.

La tabla 25 muestra una comparación sobre los datos de remoción de contaminantes efectuada en la PTAN Irapuato, de acuerdo a datos obtenidos por la PTAN Irapuato y por el laboratorio externo.

Tabla 15. Porcentaje de remoción de contaminantes de acuerdo a datos del Laboratorio externo y de la PTAN Irapuato.

Parámetro	Unidades	Entrada (Laboratorio)	Entrada (PTAN Irapuato)	Salida (Laboratorio)	Salida (PTAN Irapuato)	% Remoción (Laboratorio)	% Remoción (PTAN Irapuato)
SS	mg/L	1.5	1.5	0.3	0.3	77.3	78.4
SST	mg/L	164	128	55	46	66.2	64.0
DBO	mg/L	193	227	118	107	38.9	53.1
Grasas y Aceites	mg/L	36.4	32.9	28.7	9.0	21.3	72.6
Nitrógeno total	mg/L	41.1	37.8	37.7	11.5	8.3	69.7
Fósforo total	mg/L	13.6	6.0	13.7	3.3	-0.8	45.2
Arsénico	mg/L	0.036	0.16	0.011	0.05	70.4	69.3
Cadmio	mg/L	0.037	0.10	0.021	0.04	41.4	59.6
Cobre	mg/L	0.101	0.43	0.039	0.14	60.9	66.8
Cianuros	mg/L	0.084	0.07	0.059	0.01	30.2	80.6
Cromo	mg/L	0.069	0.20	0.020	0.07	71.5	62.7
Níquel	mg/L	0.229	0.58	0.085	0.27	62.8	53.3
Plomo	mg/L	0.141	0.37	0.046	0.15	67.7	60.0
Zinc	mg/L	0.567	1.16	0.204	0.50	64.0	56.9
Mercurio	mg/L	0.005	0.03	0.001	0.01	76.9	76.0

De esta información se determina que no se lleva a cabo una buena remoción de contaminantes, posiblemente causados por insuficiencia de capacidad de los equipos de tratamiento de agua. Se hace notar que en los contaminantes de grasas y aceites, nitrógeno total, fósforo total y cianuros; existe una mayor remoción de estos, de acuerdo a datos de la PTAN Irapuato, que en los datos generados por el Laboratorio externo. Para el resto de los contaminantes los datos reportados tienen una mayor similitud, aunque en general los reportados por la PTAN Irapuato presentan valores de remoción más altos.

La tabla 26 muestra una comparación sobre la calidad de agua de pozos, de PTAR y de PTAN Irapuato que llegaría a la refinería Ing. Antonio M. Amor si se eligiera esta opción.

Tabla 16. Tabla comparativa de calidades de agua actuales y calidad de agua PTAN Irapuato

Parámetro	Unidades	Calidad de agua de pozos	Calidad de agua PTAR	Calidad de efluente PTAN Irapuato.	
				(Laboratorio)	(PTAN Irapuato)
pH	Unidades de pH	7.9	7.3	7.57	7.14
Temperatura	°C	-	-	23.32	19.56
Dureza Calcio	mg CaCO ₃ /L	40	94	-	-
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	80	176	-	-
Conductividad	mS/cm	650	2,574	-	-
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	271	289	-	-
SiO ₂	mg/L	75	112	-	-
Cloruros	mg/L	34	203	-	-
SST	mg/L	0.5	45.2	55.31	46.18
DBO	mg/L	-	-	117.9	106.6
Grasas y Aceites	mg/L	0	21.2	28.67	9.02
Nitrógeno total	mg/L	-	5.09	37.74	11.47
Fósforo total	mg/L	1.1	17.8	13.72	3.31
Coliformes fecales	NMP /100mL (1)	-	-	1,986	-
Cianuro	mg/L	-	-	0.059	0.01
Mercurio	mg/L	-	-	0.001	0.01
Arsénico	mg/L	-	-	0.011	0.05
Cadmio	mg/L	-	-	0.021	0.04
Cobre	mg/L	0.02	0.11	0.039	0.14
Cromo	mg/L	-	-	0.020	0.07
Níquel	mg/L	-	-	0.085	0.27
Zinc	mg/L	-	-	0.204	0.50
Plomo	mg/L	-	-	0.046	0.15

Notas:

(1) NMP, numero más probable.

Las celdas que contienen el símbolo -, señala los parámetros medidos por cada uno de los laboratorios que realizaron los estudios de calidad de agua en la PTAN Irapuato.

Desafortunadamente existen pocos parámetros de comparación de los análisis de calidad efectuados al agua de pozos y PTAR, con los efectuados al efluente de la PTAN Irapuato. No obstante, se observa que el agua de la PTAN Irapuato presenta una calidad muy inferior a la de pozos, aunque en algunos parámetros presentan calidades similares a los de la PTAR. No obstante esta similitud no es buena, pues cabe recordar que el agua efluente de la PTAR no presenta actualmente una calidad totalmente aceptable. Además se busca sustituir el agua de pozos con agua de otro suministro de similar calidad, por lo que no es posible sustituirla directamente con agua de la PTAR Irapuato.

La tabla 27 muestra un comparativo sobre los parámetros del agua de la PTAN Irapuato contra los requeridos por TE y UDA's (Rogozen, 1981; DGCOH, 1987; 1989; WPCF, 1990; EPA, 1999; DGCOH; Marwan, 2003).

Tabla 17. Comparativa de calidad de agua requerida a torres y calidad de agua PTAN Irapuato

Parámetro	Límites máximos recomendados de agua de repuesto a Torres de Enfriamiento				Calidad de agua PTAN Irapuato. (Laboratorio.)	Calidad de agua PTAN Irapuato. (PTAN Irapuato)
	WPFC (1990)	EPA (1999)	DGCOH (1987)	EPRI (1981)		
Colif. Fec. (org/100mL)	-	200	-	-	1,986	-
DBO (mg/L)	25	30	20	-	118	107
Fosfatos (mg/L)	4	-	1	-	13.7*	3,3*
N-NH ₄ ⁺ (mg/L)	1	-	0.5	<2	37.7**	11.47**
pH, unidades	6.9 - 9.0	6 – 9	5 – 8.3	7-9	7.6	7.1
SST (mg/L)	100	30	500	<100	55.3	46.2

Notas:

* Como Fósforo Total.

** Como Nitrógeno Total.

Las celdas que contienen el símbolo -, señala los parámetros no especificados o medidos por cada una de las institución consultadas.

En la tabla anterior se observa que prácticamente todos los parámetros comparables del agua tratada de la PTAN Irapuato presentan valores muy superiores a los límites máximos recomendados como agua de repuesto a TE, especialmente en cuanto a DBO, nitrógeno total, coliformes fecales y fosfatos. Con relación a los Sólidos Suspendidos Totales (SST) detectados en el efluente, los valores de 55 y 46 ppm no son significativamente altos con respecto a los estándares.

Con base en lo anterior, se requeriría de un pretratamiento antes enviar el agua como repuesto a TE. No se analizan los parámetros referentes a calidad requerida a UDA's ya que los parámetros analizados son diferentes de los que se analizaron en la PTAN Irapuato, sin embargo, debido a la alta calidad de agua que requiere una UDA, resulta evidente que también se requeriría un pretratamiento antes del envío de agua tratada de la PTAN Irapuato a UDA's.

5.6.2.1.1 Opciones de pretratamiento para alcanzar la calidad requerida de servicio a TE y UDA's

El agua proveniente de la PTAN Irapuato no cumple con la calidad requerida por los procesos de la refinería Ing. Antonio M. Amor, especialmente en cuestión de DBO, fosfatos, nitrógeno y coliformes fecales; además de esto, también presenta valores altos en cuestión de sólidos suspendidos, grasas y aceites, por lo que sería necesario establecer un tren de tratamiento posterior al envío del agua negra de la PTAN Irapuato a las TE y UDA's

Resulta difícil establecer con certeza los pretratamientos requeridos, debido a que no se cuenta con la caracterización de algunos parámetros importantes, como son: Dureza, Conductividad, SDT, DQO, Turbidez, Sílice, Alcalinidad, entre otros, ya que estos parámetros no son analizados ni por el Laboratorio externo ni por la PTAN Irapuato. Es recomendable realizar una caracterización completa del efluente de la PTAN, para definir con mayor precisión los tratamientos necesarios. No obstante, a continuación se presentan opciones de pretratamientos usuales que permitirían elevar la calidad del efluente de la PTAN Irapuato.

La tabla 28 presenta las opciones de pretratamientos, tanto para alcanzar una calidad de agua de repuesto a TE, así como para alcanzar la calidad de agua requerida para las UDA's.

Tabla 18. Opciones de pretratamientos para elevar la calidad del efluente de la PTAN Irapuato.

Tren	Pretratamientos para alcanzar calidad de agua de repuesto a torres de enfriamiento				Pretratamientos adicionales para calidad a UDA's	
	Ablandamiento químico	Filtros de Arena	Unidades de adsorción por Carbón Activado	Suavización	Ultra-filtración	Ósmosis Inversa
1	-	Si	Si	Si	-	Si
2	Si	Si	-	-	-	Si
3	-	Si	Si	-	Si	Opcional

Notas:

Las celdas que contienen el símbolo -, señala procesos de pretratamiento que no son propuestos dentro de los tren planteados.

A continuación se describirán de manera más detallada los trenes de tratamiento de agua que se presentaron anteriormente.

El Tren 1, contempla el uso de Filtros de arena para eliminar turbidez y sólidos suspendidos, después de estos, se usan las unidades de adsorción por carbón activado que eliminan cloro libre y olor la Suavización eliminará la dureza para enviar el agua a TE. Adicionalmente, la unidad de ósmosis inversa se usa como pretratamiento para obtener la calidad requerida por las UDA's.

El Tren 2, está compuesto por un ablandamiento químico y filtros de arena, para eliminar materia coloidal, turbidez, sólidos suspendidos y olor con lo que el agua que se obtiene después del paso de estas unidades tiene la calidad necesaria para enviarse a las TE. Finalmente se usa una ósmosis inversa como pretratamiento a UDA's.

Tren 3, este propone el uso de filtros de arena y unidades de adsorción por de carbón activado, para eliminar sólidos suspendidos, olor, turbidez, etc., por lo que se obtiene agua con calidad para su envío a TE. Adicionalmente a esto se propone un sistema de Ultrafiltración y una ósmosis inversa opcional como pretratamiento antes de UDA's.

Los tres trenes de tratamiento son técnicamente factibles, sin embargo, con base en el tipo y calidad de agua de suministro y las calidades de agua requeridas, es recomendable el empleo de un tren de tratamiento similar al tren de tratamiento 2, en donde el contenido de grasas y aceites, fósforo, nitrógeno, SST y turbidez, pueden ser disminuidos considerablemente por medio del proceso de un ablandamiento químico. Posteriormente se requerirá una filtración y dependiendo de la concentración de la Dureza presente en el efluente (del cual no se conoce el valor), se requeriría posiblemente una suavización hasta alcanzar una concentración aceptable y similar a la del agua de pozos de 80 mg/L, antes de que el agua sea enviada a TE. Adicionalmente a los tratamientos recomendados para el agua de las torres de enfriamiento, se necesitaría instalar un equipo de ósmosis inversa, antes del envío de agua a UDA's. Cabe recordar que es necesario obtener 350 L/s de agua con calidad a TE y 250 L/s de agua con calidad a UDA's

5.6.2.1.2 Ventajas y desventajas de la opción PTAN Irapuato

Las ventajas y desventajas de esta opción se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 19. Ventajas y desventajas de la opción PTAN Irapuato.

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Se obtendrá el agua de una planta existente y en marcha. • El agua a comprar ya tiene un tratamiento previo • Existe un ducto propiedad de PEMEX actualmente fuera de servicio, que va de Salamanca a Guadalajara y pasa cerca de Irapuato, el cual si bien no tiene las dimensiones requeridas permite el uso de derecho de vía. • Tiene suficiente capacidad para entregar los 600 L/s de agua tratada necesaria para la refinería Ing. Antonio M. Amor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere de un pretratamiento antes de enviar el agua de la PTAN Irapuato a TE o a sistemas de desmineralización, debido a la deficiente calidad actual del efluente de dicha PTAN. • La distancia y por tanto la tubería requerida para el envío del agua efluente de la PTAN Irapuato a la refinería Ing. Antonio M. Amor es relativamente grande (>20 km). • Se requeriría de equipo e infraestructura de bombeo para el envío del agua. • Se compraría agua tratada de baja calidad

5.6.2.1.3 Costos de la opción PTAN Irapuato

El agua que se venderá de la PTAN Irapuato tendrá un precio elevado, debido a que el agua ya está tratada. Lamentablemente este tratamiento produce agua de mala calidad, por lo que se tendrá que invertir en un tratamiento previo a su uso. El precio en el que se está estimando la compra del agua tratada por la PTAN Irapuato es de \$3.5/m³ (0.307 USD/m³). En la siguiente tabla se presentan los resultados de las corridas económicas y más adelante los análisis de sensibilidad de este escenario.

Tabla 20. Costos de la opción de compra de agua tratada a la PTAN Irapuato (USD)

Capital de Trabajo	959,336
Inversión Total	23,983,410
Valor Presente Neto	15,413,062
Valor Presente de la Inversión	-19,651,837
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.78
Tasa Interna de Retorno	22.09%
Periodo de Recuperación de la Inversión	3 Años, 9 Meses

La TIR obtenida tiene el valor requerido por PEMEX-Refinación para su aprobación, aunado a esto, el valor de la TIR (Tasa Interna de Retorno) es elevado, lo que indica la obtención de ganancias substanciales y que es altamente rentable. El VPN (Valor Presente Neto), que representa las ganancias que se obtendrán en el tiempo de análisis establecido (22 años), es positivo y de un valor elevado. Este valor representa las ganancias obtenidas y siendo que es positivo, indica que se recupera lo invertido, punto que se ve plasmado en el valor del Índice de Rentabilidad (IR), ya que este muestra que se obtendrá lo invertido más el 0.78 de lo invertido, tal que se obtendrá casi el doble de lo invertido con esta opción. Debe señalarse que el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI) es relativamente corto pero deberá compararse con los obtenidos para el resto de las opciones con la finalidad encontrar el menor periodo de recuperación

En la siguiente tabla se muestra el análisis de sensibilidad en el cual se considera el incremento imprevisto del 20 % de la inversión.

Tabla 21. Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD)

Capital de Trabajo	959,336
Inversión Total	28,780,092
Valor Presente Neto	10,220,474
Valor Presente de la Inversión	-23,582,204
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.43
Tasa Interna de Retorno	17.83%
Periodo de Recuperación de la Inversión	4 Años, 8 Meses

Se tiene una TIR considerablemente menor que la obtenida en el caso anterior, lo que indica que no se obtendrán ganancias tan altas si se incrementara la inversión, aunado a esto su nivel de rentabilidad también decrece. Lo anterior se ve reflejado en que el valor del VPN ya que es menor al presentado en el análisis anterior. El IR también es menor, mostrándonos que se obtienen ganancias de casi la mitad de lo que se invierte inicialmente, tomando en cuenta el hecho de que lo invertido se recupera en su totalidad.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para el análisis de rentabilidad en el que se considera el aumento del 20 % en el lapso de construcción.

Tabla 22. Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD)

Capital de Trabajo	959,336
Inversión Total	23,983,410
Valor Presente Neto	14,619,612
Valor Presente de la Inversión	-19,338,864
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.76
Tasa Interna de Retorno	21.51%
Periodo de Recuperación de la Inversión	3 Años, 11 Meses

Dentro de este caso, se muestra que los valores decrecen de manera insignificante en el IR (Índice de Rentabilidad) y en la TIR, pero que no afectan en su nivel de rentabilidad. En cuanto al PRI, éste no se ve afectado en gran medida, puesto que tiene un aumento de dos meses, lo cual no disminuye la rentabilidad del proyecto.

5.6.2.2 Sustitución de agua de pozos con agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor

Esta opción plantea la compra de agua negra sin tratamiento al municipio de Celaya, y la construcción de una PTAN dentro de la refinería Ing. Antonio M. Amor. El escenario se muestra en la siguiente figura:



Figura 7. Suministro de agua negra Celaya con PTAN en RIAMA.

A diferencia de la opción anterior en la cual se compra agua negra tratada a la PTAN Irapuato, esta propuesta plantea la compra de agua negra no tratada. Lo anterior debido a que actualmente el municipio de Celaya cuenta con la cantidad suficiente de agua requerida por la refinería Ing. Antonio M. Amor (600 L/s), pero no cuenta con una planta de tratamiento para sus aguas negras. Debido a esto, se propone que el agua negra del municipio de Celaya sea tratada en una PTAN ubicada en la refinería Ing. Antonio M. Amor y que sea propiedad de PEMEX-Refinación.

El recorrido lineal desde el posible suministro de agua negra de Celaya hasta la refinería Ing. Antonio M. Amor, presenta una distancia total aproximada de 33 km. En la siguiente figura se presenta un posible recorrido vía carretera de la fuente de suministro (Celaya) a la refinería Ing. Antonio M. Amor, con una distancia aproximada de 34 km (Google earth).

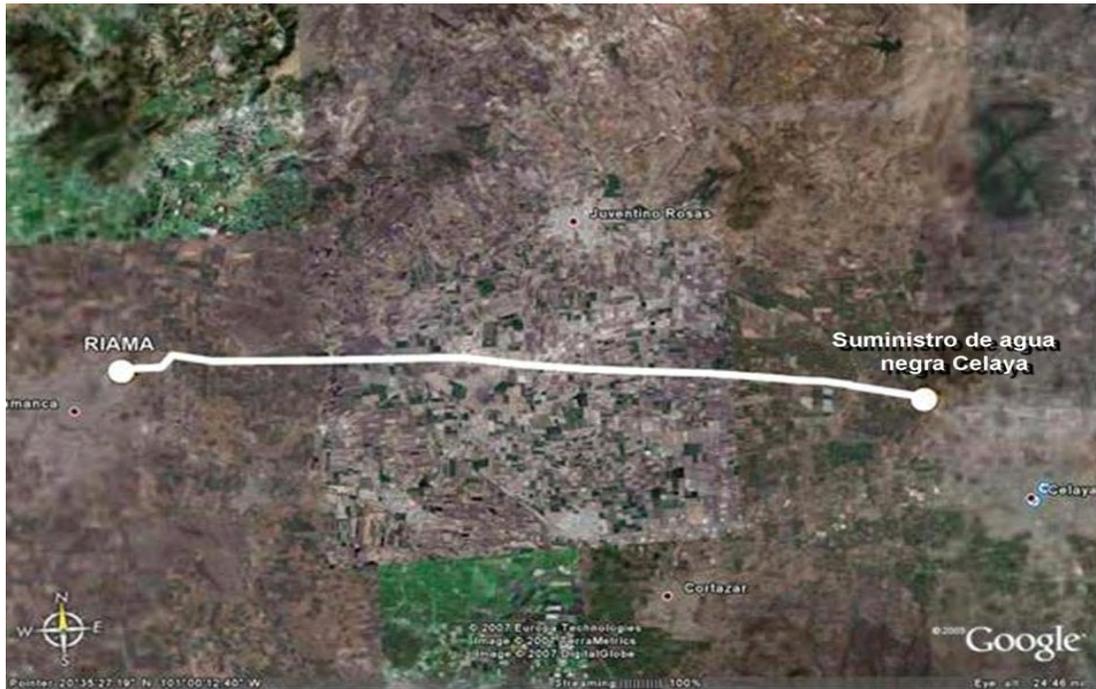


Figura 8. Recorrido vía carretera de Celaya a la refinería Ing. Antonio M. Amor. 34 km.

Debe recordarse que el municipio de Celaya se encuentra 43 m por encima de la refinería Ing. Antonio M. Amor y aunque esta diferencia de altura no es suficiente para que el agua se transporte de Celaya a la refinería Ing. Antonio M. Amor por gravedad, debe tomarse en cuenta que esta inclinación influirá para que el requerimiento de bombeo no sea tan alto.

De igual manera que en la opción anterior se llevaron a cabo simulaciones (EPANET) para determinar cuál es el escenario que permite enviar el agua de Celaya hasta la refinería Ing. Antonio M. Amor. En base a estas simulaciones, se encontró que es necesario instalar una bomba de 20 000 GPM que da 5 kg/cm² seguida inmediatamente por una bomba de 7000 GPM de 7.5 kg/cm² (en serie). Con lo que el agua llega a la refinería Ing. Antonio M. Amor con una presión suficiente para su manejo. Dentro de esta simulación también se estimó que el diámetro de la tubería deberá ser de 24", pues un diámetro más grande implicaría una sobreestimación considerable.

La figura 17 muestra los dos posibles sitios dentro de la refinería Ing. Antonio M. Amor donde dicha PTAN pudiera construirse, siendo una de ellas al norte de las fosas químicas y la otra al poniente de la laguna de estabilización (Google earth).



Figura 9. Espacios disponibles dentro de las instalaciones de la refinería Ing. Antonio M. Amor

Para esta opción es necesaria la construcción de toda una PTAN, así como la elección de equipos que conformen esta planta.

5.6.2.2.1 Opción de tratamiento para alcanzar calidad requerida de servicio a torres y UDA's

Por el momento no se dispone de información sobre la calidad de agua de dicha fuente, sin embargo, debido a que se trata de agua negra municipal, debe presentar una calidad general similar a la de otros lugares o a la calidad de agua negra reportada en literatura, a continuación en la Tabla 33 se muestra la calidad típica del agua negra sin tratar (Metcalf & Eddy, 2003).

Tabla 23. Composición típica de un agua residual municipal sin tratar

CONTAMINANTE	UNIDAD	DILUIDO	INTERMEDIO	CONCENTRADO
Sólidos totales (ST)	mg/L	390	720	1230
Sólidos disueltos totales (SDT)	mg/L	270	500	860
Fijos	mg/L	160	300	520
Volátiles	mg/L	110	200	340
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	120	210	400
Fijos	mg/L	25	50	85
Volátiles	mg/L	95	160	315
Sólidos sedimentables (SS)	mL/L	5	10	20
Demanda biológica de oxígeno 5-d (DBO ₅)	mg/L	110	190	350
Carbono orgánico total (COT)	mg/L	80	140	260
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	250	430	800
Nitrógeno total (NT) como N	mg/L	20	40	70
Orgánico	mg/L	8	15	25
Amoniacal	mg/L	12	25	45
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo total (FT) como P	mg/L	4	7	12
Orgánico	mg/L	1	2	4
Inorgánico	mg/L	3	5	8
Cloruros	mg/L	30	50	90
Sulfatos	mg/L	20	30	50
Grasas y aceites	mg/L	50	90	100
Compuestos orgánicos volátiles (COV's)	µg/L	<100	100-400	>400
Coliformes totales	No/100mL	10 ⁶ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹	10 ⁷ -10 ¹⁰
Coliformes fecales	No/100mL	10 ³ -10 ⁵	10 ⁴ -10 ⁶	10 ⁵ -10 ⁸

La concentración diluida está basada en un flujo aproximado de agua residual de 750 L/habitante-d.

La concentración media está basada en un flujo aproximado de agua residual de 460 L/habitante-d.

La concentración alta está basada en un flujo aproximado de agua residual de 240 L/habitante-d.

Por lo anterior se recomienda un tratamiento convencional de agua negra municipal como el mostrado en el esquema de tratamiento siguiente.

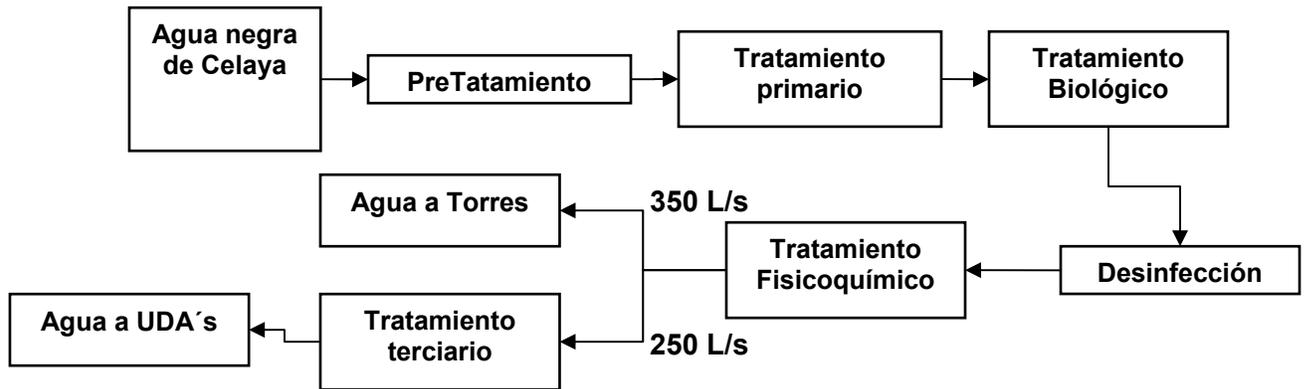


Figura 10. Opción general de tratamiento para una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor

La fuente de suministro a la PTAN de la refinería Ing. Antonio M. Amor sería el agua negra del municipio de Celaya. Se deberá efectuar un pretratamiento del agua negra correspondiente a cribado y desarenado, en un sitio de colección y antes de su envío por bombeo a la refinería Ing. Antonio M. Amor, con la finalidad de evitar daños al equipo de bombeo.

Posteriormente, se efectuará un tratamiento por Sedimentación Primaria. Este tratamiento puede ser omitido si el tratamiento biológico es del tipo lodos activados en aeración extendida. Para un tratamiento efectivo del agua negra municipal, se debe efectuar un tratamiento de tipo biológico o secundario. Se recomienda el tratamiento biológico tipo lodos activados, ya sea del tipo convencional o en aeración extendida.

Se deberá efectuar una desinfección del efluente biológico, para eliminar microorganismos patógenos.

En vista de la calidad de agua buscada y el propósito de sustituir el agua de pozos a TE, se recomienda un tratamiento fisicoquímico para eliminar SST, turbidez, dureza, fosfatos, entre otros. Dicho tratamiento pudiera ser un Ablandamiento químico o una Suavización.

El efluente de dicho tratamiento, tendrá la calidad suficiente para ser enviado a torres de enfriamiento como agua de repuesto, por lo que estos equipos tienen que tener una capacidad para tratar 600 L/s de aguas negras. Sin embargo, para el envío de agua a UDA's, se

recomienda un tratamiento adicional mediante Ósmosis Inversa, el cual debe tener la capacidad para tratar 250 L/s de aguas negras.

El tren de tratamiento final que se manejará en el desarrollo del análisis económico, se presenta en la siguiente figura.

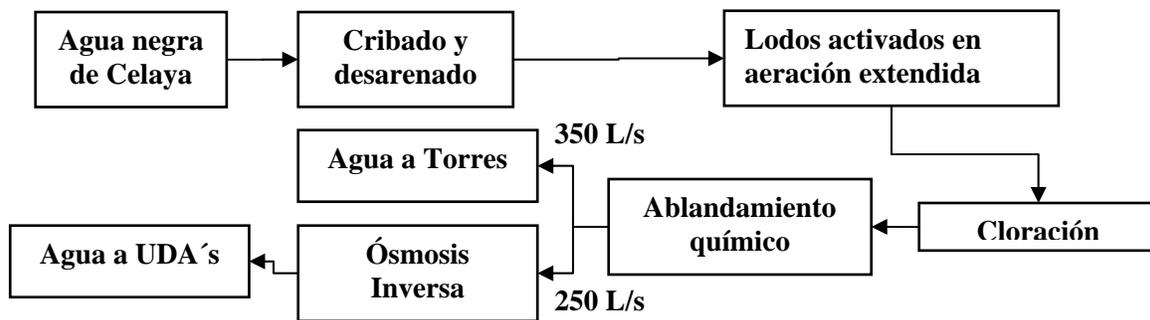


Figura 11. Opción de tratamiento para una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor.

A continuación se presentara un resumen de los aspectos más relevantes de está opción de suministro de agua.

5.6.2.2.2 Ventajas y desventajas de la opción Sustitución de agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor

Las ventajas y desventajas principales de la presente opción se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 24. Ventajas y desventajas de la opción Agua Negra Celaya con PTAN de la RIAMA

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • La PTAN pertenecería completamente a PEMEX-Refinación. • La refinería Ing. Antonio M. Amor será totalmente responsable de las calidades obtenidas en la PTAN • Se sabe que Celaya tiene suficiente capacidad para entregar los 600 L/s de agua negra que pretende la refinería Ing. Antonio M. Amor. • Debido a que la ciudad de Celaya se encuentra entre 30 y 40 m por encima de la altura de Salamanca, el requerimiento de bombeo será bajo, debido al efecto gravitacional. • Puede cambiar de suministro de Celaya a otro municipio que ofrezca la cantidad de agua negra necesaria. 	<ul style="list-style-type: none"> • Se requiere construir una PTAN completa en la refinería Ing. Antonio M. Amor. • Se requerirá la instalación de la tubería de envío de agua de Celaya a Salamanca. • La distancia entre las ciudades de Celaya y Salamanca es considerable >33 Km. • No se tiene información sobre la calidad de agua negra del municipio de Celaya. • Se debe instalar un cribado y desarenado antes del envío del agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

5.6.2.2.3 Costos de la opción Sustitución de agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor

Esta opción plantea la inversión directa en la infraestructura de la refinería Ing. Antonio M. Amor, por medio de la construcción de una PTAN dentro de la misma; por lo que este punto será de gran importancia para una toma de decisiones. Dentro de este estudio, debe mencionarse que el agua negra de Celaya se venderá a un costo de 0.62 \$/m³ (0.054 USD/m³) a la refinería Ing. Antonio M. Amor. En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos al tratamiento de datos económicos realizados para esta opción.

Tabla 25. Costos de la opción sustitución de agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor (USD)

Capital de Trabajo	1,465,357
Inversión Total	36,633,936
Valor Presente Neto	6,714,016
Valor Presente de la Inversión	-30,265,884
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.22
Tasa Interna de Retorno	15.03%
Periodo de Recuperación de la Inversión	5 Años, 8 Meses

La TIR tiene un valor bajo que se encuentra en el límite de aceptación de proyectos establecido por PEMEX-Refinación. La TIR obtenida indica que esta opción no es tan atractiva como la opción anterior, lo cual se refleja en el valor del VPN, que aunque es positivo, es de un valor absoluto menor al del valor presente de la inversión. Por lo anterior, se observa que el Índice de rentabilidad indica que se recupera la inversión inicial pero que sólo se obtiene como ganancia un cuarto de la inversión inicial, esto, dentro el periodo de estudio planteado (22 años contando el periodo de construcción). Cabe destacar que el periodo de recuperación es considerablemente más alto que el obtenido para la propuesta anterior.

Con todo esto, la opción planteada es factible económicamente, pero no es tan atractiva para invertir en ella como la opción de compra de agua a la PTAN Irapuato. En seguida se observarán los cambios que presenta esta opción en condiciones extremas.

Tabla 26. Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD)

Capital de Trabajo	1,465,357
Inversión Total	43,960,723
Valor Presente Neto	-1,648,327
Valor Presente de la Inversión	-36,319,061
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	-0.05
Tasa Interna de Retorno	11.35%
Periodo de Recuperación de la Inversión	7 Años, 2 Meses

Para la situación en la que se incremente en un 20% el monto de la inversión, la TIR obtenida tiene un valor por debajo del establecido por PEMEX-Refinación para la aceptación de un proyecto, lo que indica que si llegase a presentarse una situación igual a ésta, el proyecto no sería rentable para PEMEX-Refinación. Debido a lo anterior, aceptar esta opción conlleva altos

riesgos de pérdidas económicas. Esto se refleja en el valor del VPN, que es negativo, lo cual indica que no se recuperará lo invertido, por lo que bajo estas condiciones, esta propuesta no es rentable.

En seguida se muestran los resultados para el segundo análisis de sensibilidad en el que se plantea un incremento en el lapso de construcción.

Tabla 27. Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD)

Capital de Trabajo	1,465,357
Inversión Total	36,633,936
Valor Presente Neto	5,624,086
Valor Presente de la Inversión	-29,779,840
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.19
Tasa Interna de Retorno	14.51%
Periodo de Recuperación de la Inversión	5 Años, 8 Meses

Aunque las cifras no decrecen significativamente, la TIR es menor y se acerca más al valor límite para impuesto para la aprobación de proyectos y que aunque fuese aceptado el proyecto, las ganancias no son promisorias pues se obtendría menos de un cuarto de lo invertido, y se recuperaría la inversión en un periodo relativamente largo. Por lo anterior, se debe tomar en cuenta que esta opción conlleva demasiados riesgos económicos, decreciendo así su factibilidad.

5.6.2.3 Sustitución de agua de pozos con agua tratada de una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero

Esta opción plantea la compra de agua tratada a una PTAN en Salamanca, la cual se encuentra aún en etapa de ante proyecto, y que será operada y propiedad de una empresa privada (tercero). Se plantea el envío de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor con las calidades que la misma especifique, las cuales estarán en función del agua requerida para torres de enfriamiento (TE) y el agua para unidades desmineralizadoras de agua (UDA's), así como también su costo. El escenario que se plantea se encuentra esquematizado en la siguiente figura.

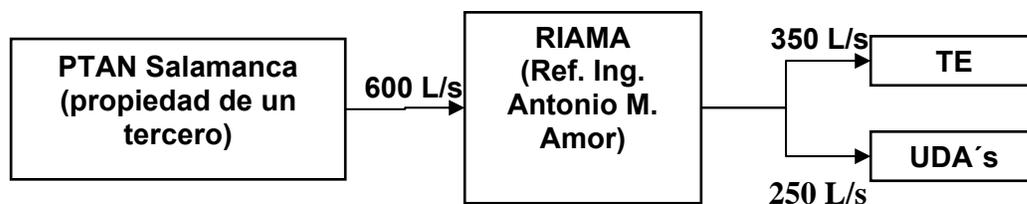


Figura 12. Suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor por una PTAN en Salamanca propiedad de un tercero

La empresa que propone la construcción de la PTAN Salamanca, está específica que de darse el convenio, la refinería Ing. Antonio M. Amor tendría la responsabilidad de comprar a dicha PTAN, un flujo de al menos 300 L/s de agua con calidad a UDA's y al menos 400 L/s de agua con calidad a TE.

Se debe recordar que el flujo requerido por la refinería Ing. Antonio M. Amor es tan sólo 600 L/s, 350 L/s con calidad a TE y 250 L/s con calidad a UDA's. Además estos flujos están sobreestimado, ya que se toman en cuenta futuros requerimientos, la compra de los flujos propuestos por la empresa, lo que representarían un exceso importante de agua.

El Consejo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Salamanca (CMAPAS) está interesado en construir una planta dentro del municipio de Salamanca, por lo cual en el año 2003 realizó un estudio de aforo y caracterización de las Aguas Residuales Urbanas de Salamanca. De acuerdo a dicho estudio, el municipio de Salamanca no podría cubrir los requerimientos de 600 L/s de agua negra, por lo cual el flujo de agua negra faltante deberá ser traído de otra fuente.

En esta opción, la empresa interesada en construir dicha PTAN asume la responsabilidad de obtener el agua negra de las fuentes que sean necesarias para cubrir el flujo especificado. También asume las responsabilidades referentes a construcción y trámites administrativos que deban realizarse para llevar a cabo la construcción y arranque de dicha planta, mientras que PEMEX-Refinación asume el compromiso de comprar el efluente especificado de agua tratada de dicha PTAN en sus diferentes calidades.

5.6.2.3.1 Tratamientos requeridos para alcanzar calidad de agua a TE y UDA's

En lo que respecta a los tratamientos y procesos requeridos para entregar a la Refinería un flujo de agua con calidad de repuesto a TE y de suministro a UDA's; la empresa interesada en construir la PTAN asume la responsabilidad de elegir e instalar los tratamientos necesarios para que se entregue el agua con las calidades especificadas. Debido a lo anterior no se analizaron alternativas de tratamiento de agua para esta opción, aunque la calidad de agua, deberán ser similares al tren de tratamiento propuesto en la opción anterior.

5.6.2.3.2 Ventajas y desventajas de la opción de compra de agua tratada a una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero

En la siguiente tabla se resumen los puntos más sobresalientes de la opción analizada:

Tabla 28. Ventajas y desventajas de la opción de compra de agua a una PTAN operada y propiedad de un tercero

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • La refinería Ing. Antonio M. Amor especifica las calidades de agua que debe tener el agua entregada. • La nueva PTAN estará ubicada cerca de la refinería Ing. Antonio M. Amor. • La responsabilidad de colección de agua, construcción de la PTAN y trámites ligados al proyecto, serán responsabilidad del tercero (empresa privada) y no de PEMEX-Refinación. 	<ul style="list-style-type: none"> • La PTAN aún no existe, la planta se encuentra en etapa de ante proyecto. • Los costos por metro cúbico de agua tratada son altos. • La empresa o tercero pretende fijar un flujo mínimo de compra de 300 L/s de agua con calidad a UDA's y 400 L/s de agua con calidad a TE.

5.6.2.3.3 Costos de la opción de sustitución de agua de pozos con agua tratada de una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero.

Esta opción no resulta redituable debido a que no se reembolsará lo invertido y no se tendrán ganancias a largo plazo, esto debido a que no se hará ninguna inversión en la infraestructura de la refinería, sino que se seguirá comprando agua como hasta ahora se ha hecho con el agua de pozos. Esto se ve reflejado en los resultados obtenidos para el estudio económico realizado, en los que no se obtienen valores para ninguno de los parámetros estudiados, a excepción del Periodo de Recuperación de la Inversión, en el que se señala que nunca se recuperara la inversión, lo cual quiere decir que mientras se compre el agua tratada a un tercero, no se redituara ningún flujo monetario. Por tales motivos la presentación de la tabla de resultados del estudio económico no será presentada.

Los resultados obtenidos se deben a que el costo de del agua tratada planteado a la refinería Ing. Antonio M. Amor por parte de la empresa privada, es de ~\$9.50/m³ (0.833 USD/ m³) para el agua de acondicionamiento a TE y de ~\$14.60/m³ para el agua con calidad a UDA's . Por lo que es pertinente comparar estos precios con el costo actual del agua extraída de pozos, que va a TE y UDA's, el cual es de \$9.11/m³ (0.799 USD/ m³), por lo anterior el costo ofrecido por el contratista es mayor al que actualmente paga la refinería Ing. Antonio M. Amor por el agua de pozos con una excelente calidad de agua. De acuerdo a lo anterior, es de esperarse que no exista una ganancia económica al invertir en la compra de agua a un tercero en comparación con la extracción de agua de pozos. Los análisis de sensibilidad no se reportaran en esta opción debido a que arrojaron resultados similares a los ya comentados.

5.6.2.4 Sustitución de agua de pozos incrementando el agua tratada de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor

Actualmente, la refinería Ing. Antonio M. Amor consume una cantidad importante de agua proveniente de la PTAR (de la refinería Ing. Antonio M. Amor), sin embargo, dicha PTAR no está trabajando a su capacidad de diseño, la cual es de 590 L/s (actualmente trabaja a 286 L/s); el flujo enviado a tratamiento y por tanto el efluente obtenido debe ser incrementado para su utilización como agua de alimentación UDA's y como agua de repuesto a TE. Cabe señalar que la PTAR está compuesta por dos trenes de tratamiento, el primero es el tren de

tratamiento de agua urbana y el segundo el tren de tratamiento de aguas de la refinería, pero son conocidos en la refinería Ing. Antonio M. Amor como un conjunto, por lo que se les identifica como PTAR.

Esta opción plantea el incremento en el efluente de tratamiento de la PTAR en 136 L/s adicionales a los actuales. Lo anterior puede ser logrado mediante una modernización de la PTAR, para lo cual ya se ha realizado un estudio, pero que no se ha puesto en marcha. El incremento en flujo planteado, se puede efectuar al elevar la capacidad de producción del tren de tratamiento de agua urbana de la PTAR a su capacidad de diseño, que es de 255 L/s, ya que actualmente opera a una capacidad de 119 L/s, debido principalmente a una serie de problemas operativos y de la baja eficiencia en los equipos. Adicionalmente, se deberá incrementar la captación y tratamiento del agua urbana que proveniente de la ciudad de Salamanca.

Por otra parte, es posible llevar a la PTAR más cerca de su capacidad de diseño, incrementando la capacidad de producción del tren de tratamiento de aguas de refinería, que tiene una capacidad de diseño de 335 L/s, pero que actualmente opera a 167 L/s en media modal, debido principalmente a problemas asociados a la calidad de agua y a la carga de contaminantes que llegan de los efluentes de la refinería Ing. Antonio M. Amor. El incremento de agua de reúso de este tren, sería efectuado con el empleo y tratamiento de una fracción del agua que actualmente se descargada al río (132 L/s), en consecuencia también se logrará disminuir las descargas. Si se llevara este tren a su capacidad de diseño, el efluente de la PTAR sería de 590 L/s, por lo que haría falta cubrir un flujo de 10 L/s por medio de otra opción o por la extracción de agua de pozos. Sin embargo, debido a que el origen de los problemas referidos está más profundamente asociado a prácticas operativas y altas descargas de contaminantes a los drenajes de la refinería Ing. Antonio M. Amor, no es posible estimar con certeza el grado en que pudiera incrementarse la capacidad del tren de tratamiento de aguas de refinería, por lo cual se asienta como premisa que al menos dicho tren podrá seguir tratando los 165 L/s que actualmente procesa.

El incremento en el flujo tratado de 136 L/s adicionales a los 286 L/s que actualmente entrega la PTAR, no será suficiente para cubrir los requerimientos de las TE y de las UDA's, por lo cual con esta opción sólo se pretende disminuir el empleo de agua de pozos. Debido a lo anterior, se deberá complementar este flujo con alguna de las tres opciones anteriormente, con la

finalidad de poder cubrir los 464 L/s de agua faltantes y alcanzar los 600 L/s de agua que se pretenden suministrar a la refinería Ing. Antonio M. Amor, o seguir cubriendo la capacidad faltante con la extracción y uso de agua de pozos. Debe recordarse que los 286 L/s que ofrece actualmente la PTAR, son usados como agua de repuesto a TE y que los 600 L/s que se buscan suministrar a la refinería Ing. Antonio M. Amor, serán usados para sustituir el agua que se extrae actualmente de pozos, por lo que los 286 L/s de la PTAR, es un flujo que es independiente y que se mantendrá constante.

Si se llevara a su capacidad de diseño el tren de tratamiento de aguas urbanas de la PTAR, se tendría el siguiente escenario:

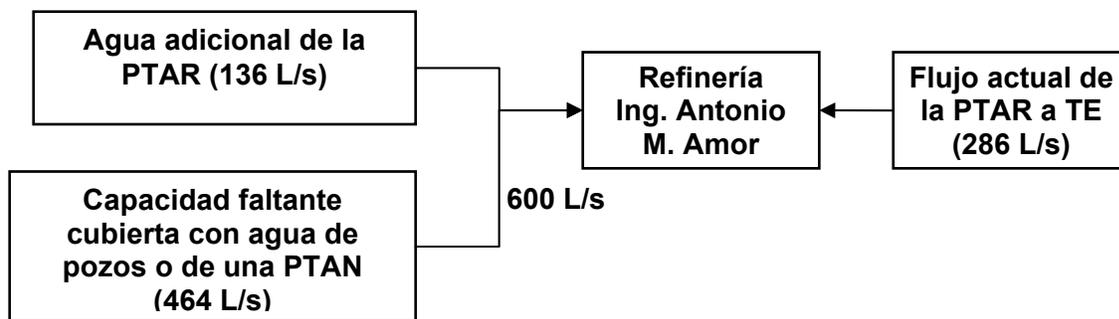


Figura 13. Repartición de agua con modernización a la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor

Cabe señalar que el posible incremento en flujo de la PTAR (136 L/s), solamente sería empleado como agua de repuesto a TE, por lo cual la disminución en el agua de extracción de pozos se vería disminuida en el mismo valor y concepto. Esto debido a que con los equipos con los que cuenta la PTAR es posible dar la calidad necesaria al agua para que esta sea enviada como suministro de agua a las TE, pero que, para ser enviada a UDA's sería necesaria la implementación de nuevos equipos para alcanzar la calidad requerida por las TE y UDAS's. Por lo que con el aumento de flujo en la PTAR se tendrán 136 L/s para enviar a TE, restando cubrir 214 L/s de agua con calidad a TE para cubrir los 350 L/s de agua con calidad a TE que se plantearon inicialmente.

Debido a lo anterior, es necesario obtener 214 L/s de agua con calidad a TE y 250 L/s de agua con calidad a UDA's de una de las tres propuestas de suministro de agua planteadas anteriormente para complementar esta propuesta.

Debido a esto, se presentarán tres opciones de combinación, que son las siguientes:

- Incremento de la capacidad de la PTAR con complemento de agua proveniente de:
 - La PTAN Irapuato.
 - Una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor que tratará agua negra de Celaya.
 - Una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero.

Con base en lo anterior, se presentarán los resultados del estudio económico para estas combinaciones en los siguientes apartados.

5.6.2.4.1 Ventajas y desventajas de la opción de incremento de agua tratada por la PTAR de refinería Ing. Antonio M. Amor

Las principales ventajas y desventajas de esta opción de incremento en el efluente de la PTAR mediante una modernización de la misma, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 29. Ventajas y desventajas de la opción de incremento del agua tratada por PTAR de refinería Ing. Antonio M. Amor

VENTAJAS	DESVENTAJAS
<ul style="list-style-type: none"> • Se moderniza e incrementa la capacidad de tratamiento de la PTAR. • Disminución del consumo de agua de pozos o los requerimientos de agua tratada de una posible PTAN. • Se invierte en la infraestructura de la refinería Ing. Antonio M. Amor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Será necesario realizar obras de modernización de equipos e infraestructura actual, así como instalación de equipos adicionales. • Se requerirá de una fuente adicional para alcanzar los requerimientos de la refinería Ing. Antonio M. Amor, ya sea agua de una PTAN o continuar con la extracción y empleo de agua de pozos.

5.6.2.4.2 Particularidades y costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor

A continuación se presentan algunas particularidades y los resultados de los análisis económicos de las opciones de modernización de la PTAR complementada con el suministro de agua de las opciones antes presentadas.

5.6.2.4.2.1 Particularidades y Costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR y compra de agua tratada a la PTAN Irapuato

Dentro de esta opción, bajarán los costos en comparación con el primer escenario mostrado, en el que sólo se manejaba la compra de agua tratada a la PTAN Irapuato debido a que es necesario comprar y tratar una menor cantidad de dicha agua. Se necesitará comprar 464 L/s de agua tratada a la PTAN Irapuato para obtener los flujos planteados.

Debe tomarse en cuenta que los trenes de tratamiento de agua que se habían planteado en las anteriores opciones, variarían en la capacidad de los equipos, debido a que se trataría un menor flujo de agua. Serán necesarios equipos que puedan tratar 464 L/s de agua negra para obtener agua con calidad a TE, de los cuales se utilizarán 214 L/s para suministrar agua a las

TE. El resto del agua que sale de esta primera parte del proceso deberá ser tratada en un equipo capaz de procesar 250 L/s de agua pretratada y entregar el agua con calidad adecuada para UDA's.

El escenario anteriormente descrito se muestra en la siguiente figura:

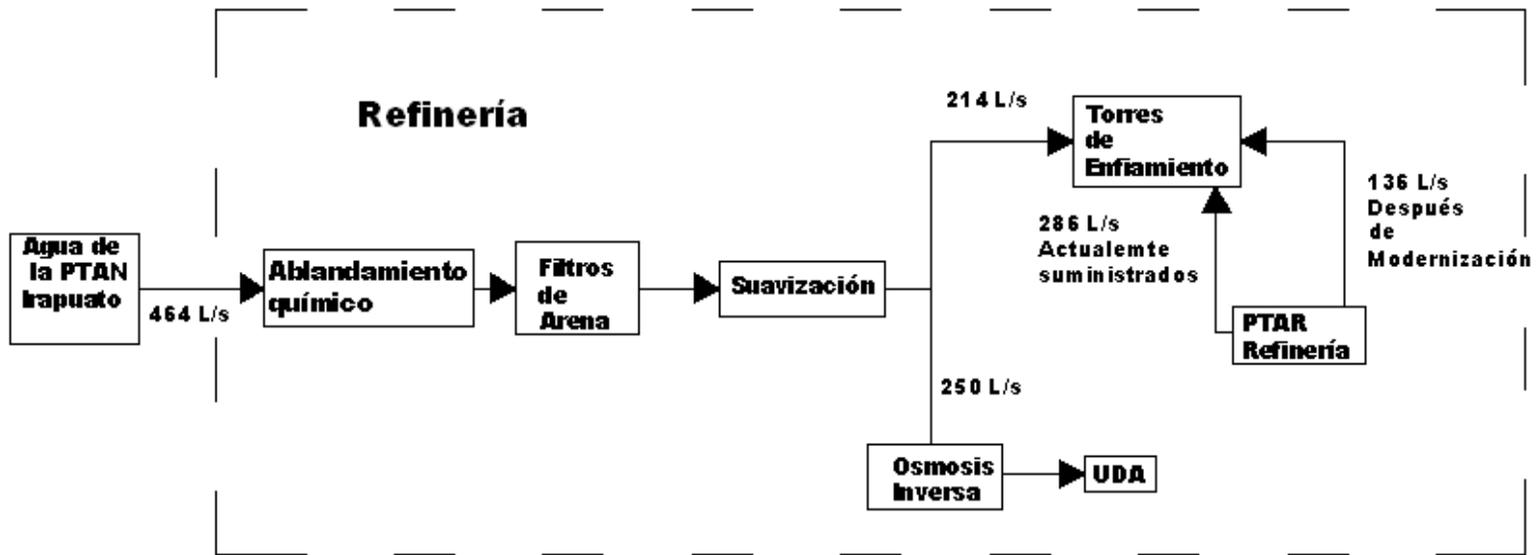


Figura 14. Suministro de agua tratada con modernización a PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y agua tratada de la PTAN Irapuato

En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis económico para esta opción:

Tabla 30. Costos de la opción de incremento de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua a la PTAN Irapuato (USD)

Capital de Trabajo	912,245
Inversión Total	22,806,120
Valor Presente Neto	21,697,192
Valor Presente de la Inversión	-19,143,821
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	1.13
Tasa Interna de Retorno	29.06%
Periodo de Recuperación de la Inversión	3 Años, 4 Meses

La TIR obtenida tiene un valor elevado en comparación con las opciones presentadas con anterioridad, lo cual refleja que esta opción posee un alto grado de rentabilidad. Lo anterior se hace constar en el elevado valor numérico del VPN, el cual representa las ganancias que se

obtendrán a lo largo del periodo de estudio planteado (22 años). Las ganancias que se tendrán se reflejan en el IR, el cual indica que se ganará poco más del doble de lo invertido y en un periodo corto de tiempo se recuperará la inversión inicial. Con esto, la actual propuesta representa hasta ahora, la mejor opción de inversión para PEMEX-Refinación.

En seguida se presentan los análisis de rentabilidad para esta opción, de modo que se comprobará si aún en condiciones desfavorables, esta opción es rentable.

Tabla 31. Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD)

Capital de Trabajo	912,245
Inversión Total	27,367,344
Valor Presente Neto	16,388,997
Valor Presente de la Inversión	-22,972,585
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.71
Tasa Interna de Retorno	22.90%
Periodo de Recuperación de la Inversión	4 Años, 2 Meses

Aún considerando el aumento en la inversión, esta opción presenta una TIR elevada, que sobrepasa a opciones antes planteadas, con lo cual se tiene un VPN alto, que indica que aún en esta situación, las ganancias que se pueden obtener son elevadas, como se muestra en el IR, que indica la ganancia de tres cuartos más de lo que se invirtió. Debe señalarse que al presentarse esta situación, aunque los resultados obtenidos aún son promisorios en comparación con los resultados obtenidos para la situación óptima, se presenta un decremento considerable en los indicadores de rentabilidad, por lo que debe considerarse que el aumento en la inversión podría desfavorecer esta opción al compararla con otras más estables ante cambios imprevistos.

Tabla 32. Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD)

Capital de Trabajo	912,245
Inversión Total	22,806,120
Valor Presente Neto	18,453,905
Valor Presente de la Inversión	-18,925,698
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.98
Tasa Interna de Retorno	24.69%
Periodo de Recuperación de la Inversión	3 Años, 4 Meses

Con el aumento en el lapso de construcción los resultados económicos decrecen, pero en menor medida que en el caso de un aumento de capital. De igual manera, se estarán obteniendo ganancias por el doble de lo que se invirtió, y la TIR indica un alto grado de rentabilidad. Por lo que aún en esta desfavorable situación, la presente opción es rentable para llevarse a cabo.

5.6.2.4.2 Particularidades y costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor e instalación de una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor para tratar agua negra de Celaya

Para esta opción, es necesario plantear que la infraestructura de tratamiento a construir estará en su mayoría, a excepción del cribado y desarenado, dentro de la refinería Ing. Antonio M. Amor. Debe aclararse que al igual que en la opción pasada, sólo se comprará al municipio de Celaya 464 L/s, los cuales se tratarán para alcanzar la calidad suficiente para su envío a TE, y solo 250 L/s pasaran por una Ósmosis Inversa para alcanzar la calidad necesaria para las UDA's.

El escenario que plantea esta propuesta se muestra en seguida:

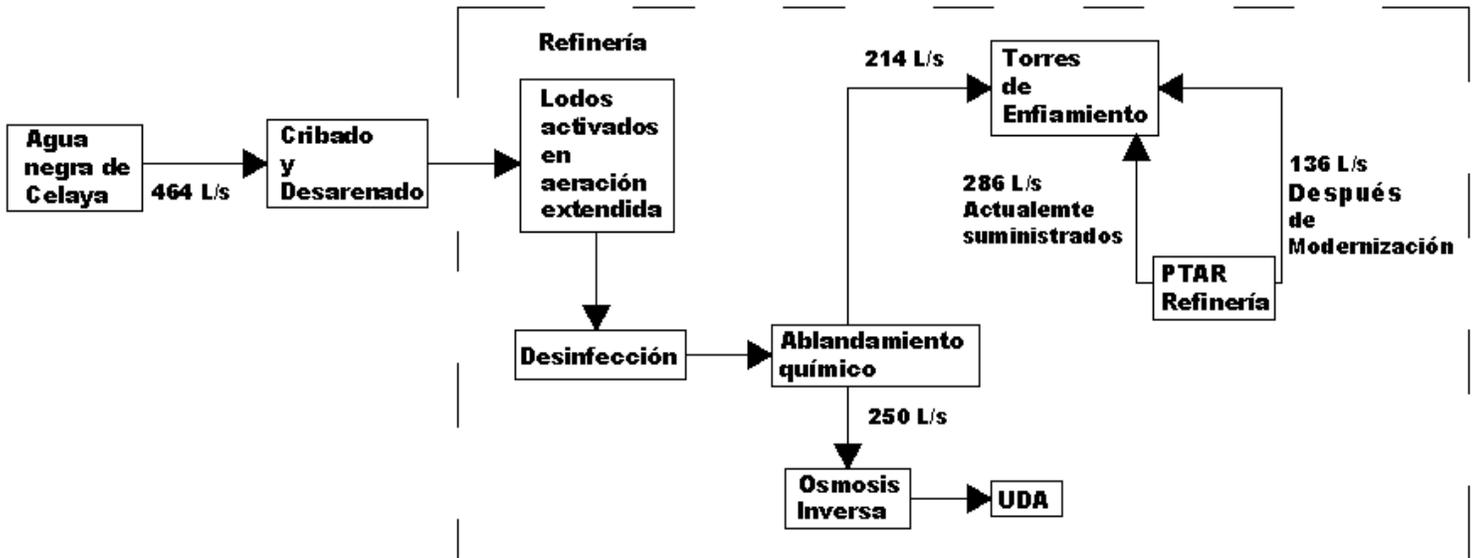


Figura 15. Suministro de agua tratada con modernización a PTAR y agua negra de Celaya tratada por una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor

En la tabla siguiente se muestran los resultados del análisis económico de este escenario, tal y como lo plantea la figura anterior.

Tabla 33. Costos del suministro de agua tratada con modernización a PTAR y agua negra de Celaya tratada por una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor

Capital de Trabajo	1,443,163
Inversión Total	36,079,076
Valor Presente Neto	11,222,380
Valor Presente de la Inversión	-30,285,351
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.37
Tasa Interna de Retorno	17.81%
Periodo de Recuperación de la Inversión	5 Años, 2 Meses

El VPN es un valor positivo, lo que indica que esta opción brinda una buen cantidad de ganancias, y éstas, como lo muestra el IR serán de cerca de un tercio de lo invertido. Se observa que el periodo de inversión es considerablemente grande, por lo que a pesar de ser rentable económicamente, esta opción no brinda ganancias considerables, lo cual se ve reflejado en el bajo valor de la TIR.

Tabla 34. Análisis de sensibilidad 1, incremento en la inversión del 20% (USD)

Capital de Trabajo	1,443,163
Inversión Total	43,294,891
Valor Presente Neto	2,671,417
Valor Presente de la Inversión	-36,342,422
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.07
Tasa Interna de Retorno	13.18%
Periodo de Recuperación de la Inversión	6 Años, 10 Meses

Si se llegase a presentar la situación analizada, se encontrará que la TIR obtenida es demasiado baja y que se encuentra en el límite impuesto por PEMEX-refinación. Aunado a esto, el periodo de recuperación de la inversión es el más extenso de las opciones analizadas anteriormente, mientras que el VPN, aunque positivo, tiene un valor pequeño, lo que se ve reflejado en que las ganancias obtenidas serán mínimas. Por lo anterior, en esta situación, la opción deja de ser rentable.

Tabla 35. Análisis de sensibilidad 2, incremento en el lapso de construcción del 20% (USD)

Capital de Trabajo	1,443,163
Inversión Total	36,079,076
Valor Presente Neto	8,049,560
Valor Presente de la Inversión	-29,940,284
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.27
Tasa Interna de Retorno	15.80%
Periodo de Recuperación de la Inversión	5 Años, 2 Meses

En comparación al análisis de sensibilidad antes presentado, las ganancias obtenidas son ligeramente mayores, al igual que el periodo de recuperación de la inversión. La TIR que es baja, indica que esta opción es poco rentable para la refinería Ing. Antonio M. Amor.

5.6.2.4.2.3 Particularidades y costos de la opción de incrementando de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua a una PTAN en Salamanca propiedad de un Tercero.

Para esta opción se invertirá en la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, y en la compra de agua tratada a una PTAN en salamanca operada y de propiedad de un tercero. En esta opción no se presenta un tren de tratamiento, debido a que el tercero que gane el concurso que se requiere para llevar acabo este supuesto escenario, será quien proponga el mejor tren de tratamiento. El escenario planteado por esta opción es la siguiente figura.

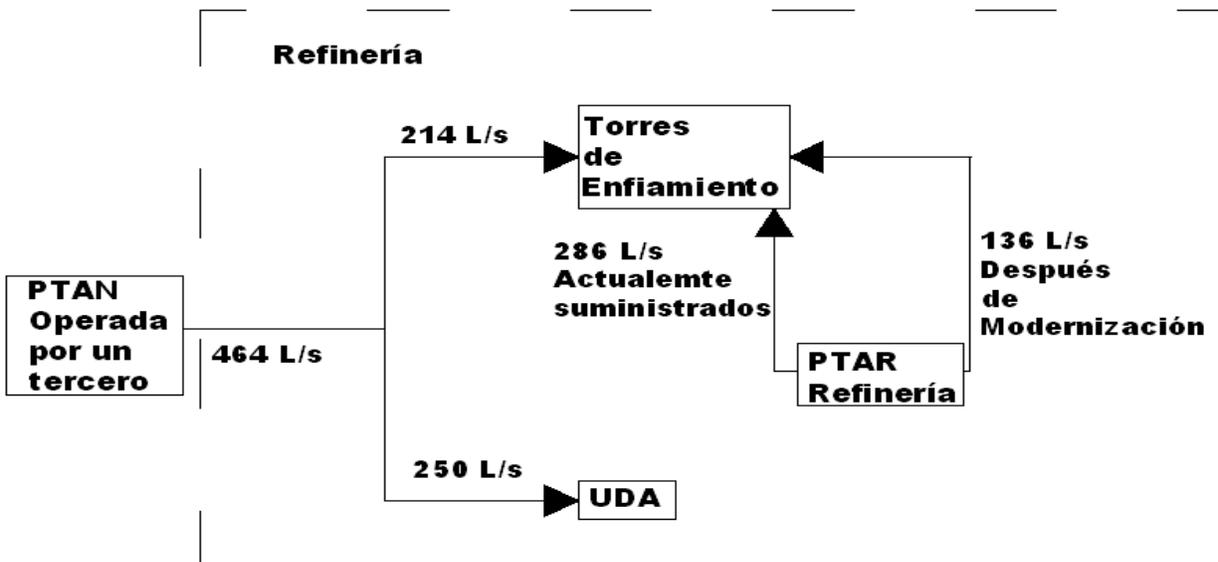


Figura 16. Suministro de agua con modernización a PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua tratada a una PTAN en Salamanca operada y propiedad de un tercero

Cabe recordar que la empresa que propone la construcción de la PTAN Salamanca, especifica que de darse el convenio, la refinería Ing. Antonio M. Amor tendría que comprarle a dicha PTAN, un flujo de al menos 300 L/s de agua con calidad a UDA´s y al menos 400 L/s de agua con calidad a TE. Por lo que se exigirá la compra de flujos mayores a los requeridos por la refinería Ing. Antonio M. Amor.

A continuación se presenta en la siguiente tabla los resultados del análisis económico que se realizó para esta opción.

Tabla 36. Costos de la opción de incremento de agua tratada por la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor y compra de agua a una PTAN en Salamanca propiedad de un tercero (USD)

Capital de Trabajo	87,944
Inversión Total	2,198,603
Valor Presente Neto	-111,764,777
Valor Presente de la Inversión	-1,845,542
Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	-60.56
Tasa Interna de Retorno	-
Periodo de Recuperación de la Inversión	Nunca

Debido a que en esta opción se presenta una inversión en infraestructura, al contrario del caso de compra de agua tratada a un tercero, en este análisis si se obtienen indicadores numéricos, los cuales nos indican que la opción no es rentable. Lo anterior se sostiene en el valor del VPN es negativo, lo que indica que no hay ganancias, sino pérdidas. El IR indica que se tendrán pérdidas de sesenta veces lo invertido, dentro del periodo de tiempo establecido (22 años) para el estudio. Por tales razones se establece en el periodo de recuperación de la inversión que no existe un periodo de recuperación de la inversión, ya que esta no se recuperara si se lleva acabo este proyecto, en conclusión está opción no es rentable.

5.7 Evaluación de las opciones tecnológicas

En el presente caso de estudio se han presentado seis opciones que son capaces de proporcionar los flujos requeridos por la refinería Ing. Antonio M. Amor, y de igual modo, las calidades exigidas por los equipos de proceso a los que alimentará. Para proponer la opción que brinde mayores beneficios, es necesario evaluar y comparar cada una de estas opciones, con este fin se seguirá la metodología antes descrita. En los siguientes apartados se seguirá paso a paso la aplicación de la metodología antes citada al caso de estudio, con la finalidad de encontrar la opción más factible.

5.7.1 Definición de los aspectos a considerar en la evaluación (Ai)

De las aspectos ya propuestos en la sección anterior, se elegirán los más relevantes, además de que se tomará en consideración la información con la que se cuenta y el tipo de opciones que se tienen. En la siguiente tabla se muestran los aspectos a considerar en este trabajo.

Tabla 37. Aspectos considerados en la evaluación de las alternativas

ASPECTO (Ai)	DECISIÓN
1. Evaluación técnica del proceso	SI
2. Evaluación de aspectos técnicos complementarios	NO
3. Evaluación económico-financiera	SI
4. Evaluación contractual	NO
5. Evaluación de aspectos plausibles	SI
6. Evaluación de aspectos estratégico-tácticos	NO
7. Evaluación de aspectos normativos	NO

Los aspectos técnicos complementarios no serán tomados en cuenta, ya que aún no se realizará una búsqueda intensa de posibles proveedores de las tecnologías propuestas, ni se cuenta con bases de usuario de dichas tecnologías. Por lo ello la información específica de este aspecto, deberá realizarse para la tecnología requerida por la nueva opción de suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor, una vez definida con el presente trabajo.

Los aspectos contractuales no se analizarán, debido a que actualmente no se tienen especificaciones de parte de las contrapartes con que se planea trabajar. Sólo se tienen algunas condiciones de cantidad y precio estimado de la empresa privada que operaría la PTAN Salamanca, además de los costos del agua negra de Celaya y del agua pretratada de la PTAN Irapuato. Información que no es suficiente para evaluar todas las opciones bajo este criterio.

En cuanto a los aspectos estratégicos-tácticos, no serán evaluados debido a la falta de información, ya que no se tienen especificaciones de tecnólogos o de empresas con las que se puede llegar a trabajar, debido a que esto dependerá de la opción que se elija para llevarse acabo.

El efecto discriminante de los aspectos normativos no será tomado en cuenta dentro de este estudio debido a que todas las opciones plantean la obtención de agua tratada de la más alta calidad, y que dentro de la operación de los equipos, las consideraciones de normatividad del proceso se deberán hacer una vez elegida la opción definitiva.

5.7.2 Identificación de los subaspectos o factores restrictivos

De un análisis de los subaspectos y factores que conforman los aspectos, se seleccionaron los siguientes criterios restrictivos o filtros, por medio de los cuales se reducirán las opciones a evaluar, estos criterios se presentan en la tabla 48.

Tabla 38. Subfactores o filtros restrictivos considerados para la evaluación

FILTRO	VALOR
Calidad requerida por torres de enfriamiento y UDA's	¿CUMPLE?
Flujo requerido por la refinería Ing. Antonio M. Amor (600 L/s)	¿CUMPLE?
Tasa Interna de Retorno (TIR) mayor al 12%	¿CUMPLE?
Periodo de recuperación de la inversión (PRI) menor a 7 años	¿CUMPLE?

Los dos primeros factores técnicos fueron considerados en base a que son características fundamentales que exige la refinería Ing. Antonio M. Amor a la opción de suministro de agua que se elija. Los dos factores económicos que se usaron como filtro, fueron elegidos con base en diferentes criterios. El primero, la TIR fue elegido porque PEMEX-Refinación lo establece como requisito para aceptar un proyecto de inversión, que tenga una TIR mayor al 12%. El segundo factor, que es el periodo de recuperación de inversión, se plantea en base a opciones que presenten un periodo de recuperación demasiado grande y que por lo tanto no representen una opción económicamente factible.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la evaluación de las opciones de suministro de agua bajo los factores antes descritos.

Tabla 39. Cumplimiento de las alternativas con los criterios restrictivos o filtros

FILTRO	Sustitución de agua de pozos					
	Con agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional	Con agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor	Con agua tratada de una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero.	Incrementando el agua tratada de la PTAR más agua proveniente de		
				La PTAN Irapuato más tratamiento adicional	Una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor que tratará agua negra de Celaya	Una PTAN en Salamanca con operación y propiedad de un tercero
Calidad requerida por TE y UDA's	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Flujo requerido por la refinería Ing. Antonio M. Amor (600 L/s)	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE	CUMPLE
Tasa Interna de Retorno (TIR) mayor al 12%	22.09% Cumple	15.03% Cumple	NO Cumple	29.06% Cumple	17.81% Cumple	NO Cumple
Periodo de recuperación de la inversión (PRI) menor a 7 años	3 Años, 9 Meses Cumple	5 Años, 8 Meses Cumple	Nunca NO Cumple	3 Años, 4 Meses Cumple	5 Años, 2 Meses Cumple	Nunca NO Cumple

De acuerdo a los resultados obtenidos en la tabla anterior, es necesario descartar las opciones que no cumplan con los filtros planteados, ya que estos filtros son aspectos primordiales con los que debe cumplir la opción de suministro de agua que se vaya a elegir.

La opción que plantea la compra de agua tratada con las calidades especificadas por la refinería Ing. Antonio M. Amor, a una PTAN operada y propiedad de un tercero, es descartada debido a que no tiene una TIR mayor a 12%, ya que como se mencionó anteriormente es un requisito impuesto por PEMEX-Refinación para aceptar un proyecto. Debido a que se invierte en la compra de agua y no en infraestructura que produzca algún bien material, el periodo de recuperación de la inversión indica que la inversión que se realice nunca se recuperará, con lo que la PEMEX-Refinación no tendría ganancias económicas. Esto es de esperarse, ya que

debe recordarse, que el agua extraída de pozos actualmente cuesta \$9.11/m³ (0.799 USD/m³), mientras que el agua con calidad a TE se costeo por la empresa en ~\$9.50/m³ (0.833 USD/m³), y en ~\$14.60/m³ (1.281 USD/m³) el agua con calidad a UDA's. Por ello se puede apreciar a primer instancia, que con estos precios nunca se recuperará lo invertido.

La segunda opción que se descartó en el filtro, es la que plantea la sustitución del agua de pozos por agua proveniente del incremento de agua tratada en la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, más la compra de agua a una PTAN en Salamanca propiedad de un tercero, debido a que no presenta una TIR, ya que no existe inversión en infraestructura que produzca algún bien y que nunca se recuperará la inversión hecha en la compra de agua. Además de estos parámetros, también el valor presente neto, con su valor negativo, confirma las aseveraciones anteriores.

Las opciones que pasaron por el proceso de filtración, son las que cumplen con los principales requerimientos planteados por la refinería Ing. Antonio M. Amor. Estas cuatro opciones restantes son las que se evaluarán con la finalidad de encontrar cuál de ellas ofrece mayores beneficios.

5.7.3 Decisión del tipo de evaluación

Debido fundamentalmente a que la información cuantitativa con que se cuenta no es suficiente para estructurar adecuadamente una evaluación económico-financiera, se seleccionó la técnica matricial de evaluación.

Como ejemplo de la carencia de información para establecer el estado económico-financiero de estas opciones, se puede citar la falta de datos relacionados con: número de equipos de relevo, automatización, factor de servicio, alcances de los paquetes de diseño, necesidades de entrenamiento de personal, necesidades de mantenimiento, requerimientos especiales para montaje y puesta en marcha, entre otros. Por lo tanto, se proseguirá con la metodología de evaluación matricial, en la que el siguiente paso es la asignación del peso o puntaje de los aspectos.

5.7.4 Desarrollo de la técnica matricial de evaluación

Se optó por la utilización de esta técnica cualitativa tomando en cuenta la clase de información con la que se contaba de cada una de las alternativas presentadas. En este paso se procede a asignar el peso o puntaje a cada uno de los aspectos considerados (P_i), en donde:

$$100 = \sum P_i \quad (6)$$

El peso asignado a cada aspecto considerado para la evaluación, se presentan a continuación en la tabla 50.

Tabla 40. Puntaje asignado a cada aspecto considerado

ASPECTO	PUNTAJE (%)
Aspectos técnicos del proceso	40%
Aspectos económico-financieros	40%
Evaluación de aspectos plausibles	20%
TOTAL	100%

5.7.5 Selección de los subaspectos y factores para cada aspecto

Del análisis de subaspectos y factores que conforman un aspecto se seleccionaron los siguientes para usará en la siguiente evaluación:

Tabla 41. Subaspectos y factores considerados para cada aspecto

ASPECTO	SUBASPECTOS	FACTORES
1. Aspectos técnicos del proceso (operación)	a. Características relevantes del proceso	<ul style="list-style-type: none"> -Situación actual -Distancia de las planta de suministro a refinería Ing. Antonio M. Amor -Diferencia de alturas -Requerimiento de bombeo -Calidad de agua de suministro principal -Pretratamientos adicionales requerido
	b. Flexibilidad del proceso	<ul style="list-style-type: none"> -Capacidad de operación (caso crítico) -Automatización
	c. Mano de obra requerida	<ul style="list-style-type: none"> -Operación -Laboratorio
3. Aspectos económico-financieros	a. Inversión en terreno, edificios, materiales y equipo	<ul style="list-style-type: none"> -Destino de inversión -Ingeniería básica y de detalle -Operación -Materias Primas -Servicios auxiliares -Costo de personal por año
	b. Parámetros de rentabilidad del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> -Tasa interna de retorno (TIR) -Valor presente neto (VPN) -Índice de Rentabilidad (VPN / VPI) -Periodo de retorno de la inversión -TIR análisis de sensibilidad 1 -TIR análisis de sensibilidad 2
5. Evaluación de aspectos plausibles	a. Criterios macro-económicos y sociales	<ul style="list-style-type: none"> -Generación de plazas de trabajo -Integración de proyectos a los planes nacionales (tratamiento agua Municipal) -Periodo presidencial municipal -Procedencia del agua a tratar
	b. Criterios tecnológicos	<ul style="list-style-type: none"> -Impacto paisajístico -Terreno -Calidad de agua a tratar -Movimiento de tierras -Aumento de consumo de energía para la refinería Ing. Antonio M. Amor -Alteración cubierta vegetal

5.7.6 Asignación de los puntajes o pesos para los subaspectos y factores de cada aspecto

La asignación de los puntajes en porcentaje de los subaspectos o factores, se realizó bajo la base de que:

$$100 = \sum W_i \quad \text{Para los subaspectos considerados} \quad (2)$$

$$100 = \sum v_i \quad \text{Para los factores considerados en cada subaspecto} \quad (3)$$

El resultado de la asignación de valores a cada uno de los subaspectos y factores se muestra en la tabla 52 que a continuación se presenta.

Tabla 42. Pesos asignados a los subaspectos y factores para cada aspecto utilizado

ASPECTO	VALOR PORCENTUAL	SUBASPECTOS	VALOR PORCENTUAL	FACTORES	VALOR PORCENTUAL
1. Aspectos técnicos del proceso (operación)	40	d. Características relevantes del proceso	80	Situación actual de plantas	20
				Distancia de las planta de suministro a la refinería Ing. Antonio M. Amor	10
				Diferencia de alturas	10
				Requerimiento de bombeo	20
				Calidad de agua de suministro principal	20
				Pretratamientos adicionales requeridos	20
				TOTAL	100
		e. Flexibilidad del proceso	10	Capacidad de operación (caso crítico)	50
				Automatización	50
				TOTAL	100
f. Mano de obra requerida	10	Personal de Operación	70		
		Laboratorio	30		
TOTAL	100	TOTAL	100		
3. Aspectos económico-	40	c. Inversión en	30	Destino de inversión	40
				Ingeniería básica y de detalle	10

ASPECTO	VALOR PORCENTUAL	SUBASPECTOS	VALOR PORCENTUAL	FACTORES	VALOR PORCENTUAL	
financieros		terreno, edificios, materiales y equipo		Operación	15	
				Materias primas	10	
				Servicios auxiliares	20	
				Costo de personal por año	5	
				TOTAL	100	
		d. Parámetros de rentabilidad del proyecto	70		Tasa interna de retorno (TIR)	30
					Valor presente neto (VPN)	20
					Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	15
					Periodo de retorno de la inversión	15
					TIR análisis de sensibilidad 1	10
					TIR análisis de sensibilidad 2	10
		TOTAL	100	TOTAL	100	
5.Evaluación de aspectos plausibles	20	c. Criterios macro-económicos y sociales	50	Generación de plazas de trabajo	20	
				Integración de proyectos a los planes nacionales (tratamiento agua Municipal)	30	
				Periodo presidencial municipal	10	
				Procedencia del agua a tratar	40	
				TOTAL	100	
		d. Criterios tecnológicos	50		Impacto paisajístico	20
					Terreno	20
					Calidad de agua a tratar	20
					Movimiento de tierras	10
					Aumento de consumo de energía en la refinería Ing. Antonio M. Amor	20
		Alteración de la cubierta vegetal	10			
TOTAL	100	TOTAL	100			

5.7.7 Asignación de la escala de calificación

Se decidió emplear una escala como la ya mencionada en la presentación de la metodología, la cual consiste en un rango del 1 al 5, en donde no se toman en cuenta los valores 2 y 4, para facilitar la discriminación. En la siguiente tabla se presentan estas calificaciones.

Tabla 43. Determinación de la escala de calificación

DESCRIPCIÓN	CALIFICACIÓN (<i>C_i</i>)
Atributo No disponible o Inaceptable	0
Calificación mínima (la peor situación de literatura u opción que se tenga)	1
Calificación media (atributo promedio)	3
Calificación máxima (lo reportado en la literatura o la mejor situación que se tenga) (<i>mC_i</i>)	5

5.7.8 Calificación de los factores considerados, usando la escala descrita

Los valores de esta escala de calificaciones dependen de cada uno de los casos a calificar y de los criterios bajo los que se examinan, siempre dentro de la comparación de las opciones. La presente escala de calificaciones es usada debido a que facilita la diferenciación de los factores evaluados (escala propuesta por McConnell y Khalil, 1998).

A continuación se presentan los criterios bajo los que se asignaron las calificaciones, para cada uno de los factores que se eligieron.

Tabla 44. Criterios de calificación

			VALOR				
Aspecto	Subaspecto	Factor	0	1	3	5	
Aspectos técnicos del proceso (operación)	Características relevantes del proceso	Situación actual de plantas	Sin estudio	Proyecto	Operando en malas condiciones	Operando en buenas condiciones	
		Distancia de las planta de suministro a Refinería Ing. Antonio M. Amor (km)	No disponible	40-25	25-5	5>	
		Diferencia de alturas (m)	No disponible	50-20 en oposición al flujo	50-20 a favor del flujo	20-0	
		Requerimiento de bombeo	Altos (gran distancia, diferencia de alturas)	Medios (distancia relevante)	Bajos (poca distancia y poca diferencia de altura)	Ninguno, flujo por gravedad	
		Calidad de agua de suministro principal	No disponible	Baja para TE	Requerida para TE, baja para UDA`s	Requerida para UDA`s	
		Pretratamientos adicionales a construir o requeridos	Modernización PTAR – PTAN nueva	PTAN nueva	Modernización PTAR –equipos nuevos	Equipos nuevos	
	Flexibilidad del proceso	Capacidad de operación en caso crítico (más del 100%)	0%	0-5%	5 – 10%	10-20%	
		Automatización	No es posible	Algunos equipo	Parcial	Total	
	Mano de obra requerida	Personal de Operación (Nuevo)	No disponible	5>	5-2	0-1	
		Laboratorio personal	No disponible	3>	3-1	Existente	
	Aspectos Inversión en		Destino de Inversión	Equipos o plantas fuera de	Equipos dentro y fuera de la	Equipos dentro de la refinería	Planta completa dentro de la

			VALOR			
Aspecto	Subaspecto	Factor	0	1	3	5
Evaluación de aspectos			refinería Ing. Antonio M. Amor	refinería Ing. Antonio M. Amor	Ing. Antonio M. Amor	refinería Ing. Antonio M. Amor
		Ingeniería básica y de detalle (Miles USD)	No disponible	700-1000	400-700	200-400
		Operación (miles USD/año)	No disponible	700-900	500-700	Menor a 500
		Materias primas (Millones USD/año)	No disponible	7-4	4-1	1-0
		Servicios auxiliares (Millones USD/año)	No disponible	6-3	3-1	1-0
		Costo de personal (miles USD/año)	No disponible	150-100	50-100	0-50
	Parámetros de rentabilidad del proyecto	Tasa interna de retorno (TIR)	Menor a 12%	12-20%	20-25%	Mayor a 25%
		Valor presente neto (VPN) (millones USD)	Negativo	0-10	10-20	Más de 20
		Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	Menor a 0	0-0.5	0.5-1	1-1.5
		Periodo de retorno de la inversión	Nunca	10-7 años	7-4 años	4 años>
		TIR análisis de sensibilidad 1 (%)	Menor a 12	12-25	20-25	25-30
		TIR análisis de sensibilidad 2 (%)	Menor a 12	12-25	20-25	25-30
	macro-	Generación de plazas de trabajo	No genera plazas de trabajo	Más plazas de trabajo durante la construcción	Pocas plazas de trabajo fijas y más dentro de construcción	Varias plazas fijas y de construcción

			VALOR			
Aspecto	Subaspecto	Factor	0	1	3	5
		Integración de proyectos a los planes nacionales (tratamiento agua municipal)	No disponible	No se integra a ningún plan nacional	Apoya parcialmente planes nacionales	Integración y apoyo de planes nacional
		Periodo presidencial municipal	No disponible	3er año	1er año	2do año
		Procedencia del agua a tratar	Otro municipio	Refinería Ing. Antonio M. Amor e/o Irapuato	Refinería Ing. Antonio M. Amor y Salamanca	Refinería Ing. Antonio M. Amor y/o Celaya
	Criterios tecnológicos	Impacto paisajístico	Dentro de áreas verdes o centros sociales	Cambio fuera complejos industrial	Varios dentro de instalaciones industriales	Pocos dentro de instalaciones industriales
		Terreno	No disponible	Fuera de instalaciones industriales	Dentro de instalaciones industriales	Ninguno
		Calidad de agua a tratar	No disponible	Buena calidad	Mala calidad, con previo tratamiento	Sin pretratamiento, agua negra
		Movimiento de tierras	No disponible	Remoción total	Remoción parcial	Sin movimiento
		Aumento de consumo de energía en la refinería Ing. Antonio M. Amor	Alto	Medio	Bajo	Sin aumento
		Alteración de la cubierta vegetal	Sin información	Total	Parcial	Sin alteración

Una vez establecidos los criterios con los que se asignarán las calificaciones a cada uno de los factores de las cuatro opciones, se procede a plantear los factores individuales a calificar para cada una de las cuatro opciones a evaluar, esto se planteara en el siguiente apartado.

5.7.9 Comparación técnica de opciones

A continuación se presentan los factores de las opciones a evaluar bajo los diferentes criterios de evaluación propuestos.

Tabla 45. Comparación de opciones

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional	Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor	Incremento de capacidad de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, más compra de agua a PTAN Irapuato	Incremento de capacidad de la PTAR, más una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor
Aspecto	Subaspecto	Factor				
Aspectos técnicos del proceso (operación)	Características relevantes del proceso	Situación actual de plantas	Operando en malas condiciones	Sin estudio	PTAR con estudio previo, PTAN Irapuato operando en malas condiciones	PTAR con estudio previo, Sin estudio PTAN en refinería Ing. Antonio M. Amor
		Distancia de las planta de suministro a la refinería Ing. Antonio M. Amor, vía carretera (km)	24	34	24	34
		Diferencia de alturas (m)	2 a favor del flujo	43 a favor del flujo	2 a favor del flujo	43 a favor del flujo
		Requerimiento de bombeo	Altos, 2 bombas 20,000 GPM	Medios, 1 bomba 20,000 GPM y 1 bomba 7,000 GPM	Medios, 2 bombas de 7,000 GPM	Bajos, 1 bomba 7,000 GPM
		Calidad de agua de suministro principal	Baja para TE	No disponible, agua negra sin tratar	Baja para TE	No disponible, agua negra sin tratar
		Pretratamientos adicionales a construir o requeridos	Equipos nuevos	PTAN nueva	Modernización PTAR - equipos nuevos	Modernización PTAR, PTAN nueva
	Flexibilidad del proceso	Capacidad de operación en crítico (más del 100%)	5 – 10%	5-10%	0-5%	0-5%
		Automatización	Total	Total	Parcial	Parcial
	Mano de obra requerida	Personal de Operación (Nuevo)	3	6	3	4
		Laboratorio Personal	existente	1	existente	1

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional	Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor	Incremento de capacidad de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, más compra de agua a PTAN Irapuato	Incremento de capacidad de la PTAR, más una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor
Aspecto	Subaspecto	Factor				
Aspectos económico-financieros	Inversión en terreno, edificios, materiales y equipo	Destino Inversión	Equipos dentro de refinería Ing. Antonio M. Amor	Planta completa dentro y equipos fuera de la refinería Ing. Antonio M. Amor	Equipos dentro de la refinería Ing. Antonio M. Amor	Planta completa dentro de la refinería Ing. Antonio M. Amor
		Ingeniería básica y de detalle (USD)	255,844	528,524	724,299	1,008,181
		Operación (USD)	464,418	797,733	483,674	830,403
		Materias primas (USD/año)	5,252,211	930,392	4,061,750	719,510
		Servicios auxiliares (USD/año)	1,606,746	5,257,653	1,264,541	3,111,842
		Costo de personal (USD/año)	57,462	113,013	51,565	113,013
	Parámetros de rentabilidad del proyecto	Tasa interna de retorno (TIR)	22.09%	15.03%	29.06%	17.81%
		Valor presente neto (VPN) (USD)	15,413,062	6,714,016	21,697,192	11,222,380
		Índice de Rentabilidad (VPN / VPI)	0.78	0.22	1.13	0.37
		Periodo de retorno de la inversión	3 Años, 9 Meses	5 Años, 8 Meses	3 Años, 4 Meses	5 Años, 2 Meses
		TIR análisis de sensibilidad 1	17.83%	11.35%	22.90%	13.18%
		TIR análisis de sensibilidad 2	21.51%	14.51%	24.69%	15.80%
	n de aspectos	Criterios macro-	Generación de plazas de trabajo fijas	Más plazas de trabajo durante la construcción	Varias plazas fijas y de construcción	Pocas plazas de trabajo fijas y más dentro de construcción

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional	Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor	Incremento de capacidad de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, más compra de agua a PTAN Irapuato	Incremento de capacidad de la PTAR, más una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor
Aspecto	Subaspecto	Factor				
		Integración de proyectos a los planes nacionales (tratamiento agua municipal)	Apoya parcialmente planes nacionales, mejorando la calidad de descarga de agua en Irapuato	Integración y apoyo de planes nacional, tratamiento de agua negra (actualmente sin tratar) de Celaya	Apoya parcialmente planes nacionales, mejorará la calidad de descarga de Irapuato y los tratamiento de PTAR	Integración y apoyo de planes nacional, dará tratamiento al agua municipal de Celaya y mejoramiento PTAR
		Periodo presidencial municipal	2do año Irapuato-Salamanca	2do año Celaya-Salamanca	2do año Irapuato-Salamanca	2do año Celaya-Salamanca
		Procedencia del agua a tratar	Irapuato	Celaya	RIAMA e Irapuato	RIAMA y Celaya
	Criterios tecnológicos	Impacto paisajístico	Pocos dentro de instalaciones industriales	Varios dentro de instalaciones industriales	Varios dentro de instalaciones industriales	Varios dentro de instalaciones industriales
		Terreno	No disponible	Dentro de instalaciones industriales y fuera en Irapuato	No disponible	Dentro de instalaciones industriales
		Calidad de agua a tratar	Mala calidad, con previo tratamiento	Sin pretratamiento, agua negra	Mala calidad, con previo tratamiento	Sin pretratamiento, agua negra
		Movimiento de tierras	Sin información	Remoción parcial	Sin información	Remoción parcial
		Aumento de consumo de energía en la refinería Ing. Antonio M. Amor	Bajo	Alto	Medio	Medio
		Alteración de la cubierta vegetal	Sin información	Parcial	Sin información	Parcial

Establecidas las escalas de evaluación y el estado de cada una de las opciones, se procede a elaborar una matriz con las calificaciones asignadas a cada uno de los factores de las opciones, para obtener una calificación total que nos indicara cual es la opción que aporta mayores beneficios como suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

5.7.10 Generación de la matriz de resultados de la evaluación

A continuación se presentan las calificaciones y los puntajes obtenidos para cada una de las opciones dentro de los factores, subaspectos y aspectos que se han evaluado. Obteniendo así al final una calificación total para cada una de las opciones de suministro que se evaluaron.

Tabla 46. Evaluación de opciones

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional				Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a PTAN Irapuato				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a Celaya y una PTAN en refinería Ing. Antonio M. Amor				
Aspecto	Subaspecto	Factor	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	
Aspectos técnicos del proceso (operación)	Características relevantes del proceso	Situación actual de plantas	3	12	42	23	0	0	13	10	3	12	38	20	1	4	19	12	
		Distancia de las planta de suministro a la refinería Ing. Antonio M. Amor, vía carretera	3	6			1	2				3	6			1	2		
		Diferencia de alturas	5	10			3	6				5	10			3	6		
		Requerimiento de bombeo	0	0			1	4				1	4			3	12		

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional				Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a PTAN Irapuato				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a Celaya y una PTAN en refinería Ing. Antonio M. Amor									
Aspecto	Subaspecto	Factor	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos						
		Calidad de agua de suministro principal	1	4			0	0			1	4			0	0								
		Pretratamientos adicionales a construir o requeridos	5	20			1	4			3	12			0	0								
	Flexibilidad del proceso	Capacidad de operación (caso crítico)	3	30	8		3	30	8		1	10	4		1	10	4		1	10	4	3	30	
		Automatización	5	50			5	50			3	30			3	30								
	Mano de obra requerida	Personal de operación	3	42	7.2		1	14	3.2		3	42	7.2		3	42	6		3	42	6	3	18	
		Laboratorio, personal	5	30			3	18			5	30			3	18								
	Aspectos económico-financieros	Inversión en terreno, edificios, materiales y equipo	Destino de inversión	3	24		20	25	5		40	19	14		3	24	17		33	5	40	18	1	2
			Ingeniería básica y de detalle	5	10			3	6		1		2		1	2								
Operación			5	15	1	3		5	15	1	3													
Materias primas			1	2	5	10		1	2	5	10													
Servicios auxiliares			3	12	1	4		3	12	1	4													
Costo de personal por año			3	3	1	1		3	3	1	1													
Tasa interna de retorno (TIR)		3	18	43	1	6	17	5	30	64	1	6	24											

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional				Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a PTAN Irapuato				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a Celaya y una PTAN en refinería Ing. Antonio M. Amor				
Aspecto	Subaspecto	Factor	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	
		Valor presente neto (VPN)	3	12			1	4			5	20			3	12			
		Índice de rentabilidad (VPN / VPI)	3	9			1	3			5	15			1	3			
		Periodo de retorno de la inversión	5	15			3	9			5	15			3	9			
		TIR análisis de sensibilidad 1	1	2			0	0			3	6			1	2			
		TIR análisis de sensibilidad 2	3	6			1	2			3	6			1	2			
Evaluación de aspectos plausibles	Criterios macro-económicos y sociales	Generación de plazas de trabajo fijas	1	4	20	8	5	20	50	15		3	12	24	8	5	20	50	16
		Integración de proyectos a los planes nacionales (tratamiento de agua municipal)	3	18			5	30				3	18			5	30		
		Periodo presidencial municipal	5	10			5	10				5	10			5	10		
		Procedencia del agua a tratar	1	8			5	40				1	8			5	40		
	Criterios tecnológicos	Impacto paisajístico	5	20	22		3	12	24			3	12	14		3	12	30	
		Terreno	0	0			1	4				0	0			3	12		

Opción			Agua tratada de la PTAN Irapuato más tratamiento adicional				Agua negra de Celaya y una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a PTAN Irapuato				Incremento de capacidad de la PTAR, más compra de agua a Celaya y una PTAN en refinería Ing. Antonio M. Amor							
Aspecto	Subaspecto	Factor	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos	Calificación	Factores	Subaspectos	Aspectos				
		Calidad de agua a tratar	3	12			5	20			3	12			5	20						
		Movimiento de tierras	0	0			3	6			0	0			3	6						
		Aumento de consumo de energía en la refinería Ing. Antonio M. Amor	3	12			0	0			1	4			1	4						
		Alteración de la cubierta vegetal	0	0			3	6			0	0			3	6						
TOTAL							56					39					60					44

De acuerdo a la evaluación que se llevo acabo, se encontró que la opción que cuenta con mayores beneficios, dentro de los diferentes aspectos manejados es el suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor por medio del tratamiento de agua proveniente de la PTAN Irapuato más la modernización del tren de tratamiento de agua urbana de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor. Mientras que las mejores opciones a realizarse después de la ya mencionada, es la compra de agua pre-tratada a la PTAN Irapuato y la modernización de la PTAR más la compra de agua negra a Celaya.

5.7.11 Análisis de resultados

Dentro de los **aspectos técnicos del proceso**, se encontró en los subaspectos lo siguiente:

-Para las características relevantes del proceso, la mejor opción es la de compra de agua a la PTAN Irapuato, esto es principalmente debido a dos factores. El primero es debido a que la PTAN Irapuato se encuentra actualmente en operación, a diferencia de las opciones de compra de agua negra a Celaya, debido a que no se tienen ningún estudio sobre una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor, por lo que el tiempo, los gastos económicos del estudio y la construcción de una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor se ahorran al comprar agua a la PTAN Irapuato. El segundo factor decisivo se encuentra en que la opción de compra de agua a la PTAN Irapuato requiere la implementación de un menor número de equipos de proceso, en comparación con la construcción de una nueva planta de tratamiento.

-Dentro de la flexibilidad del proceso, las opciones en las que no se incluye una modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, tienen un mayor puntaje ya que si se planea modernizar la PTAR, la automatización completa de la misma es más difícil de llevarse a cabo, debido a que los equipos que operan en ella no son recientes por lo cual sería más complicado automatizar todos estos equipos, en comparación con la automatización de equipos nuevos. Aunado a lo anterior, dichos equipos tienen una determinada capacidad y no se cambiarán por nuevos equipos de mayor capacidad, por lo cual en un caso crítico de operación, la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor no podría cubrir grandes demandas adicionales a las de diseño. Mientras que para las opciones en donde no se planea llevar a cabo una modernización del a PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, se pueden tomar en cuenta los críticos al momento de especificar las capacidades de los nuevos equipos. Por tales motivos las opciones que plantean una modernización de la PTAR de la refinería obtuvieron un menor puntaje en este subaspecto.

-La mano de obra requerida para las opciones que involucran la compra de agua a la PTAN Irapuato requieren de un menor número de trabajadores para la operación y la construcción del tren de tratamiento, ya que en estas opciones se tiene una serie de equipos a operar y no una PTAN, la cual tienen un mayor número de equipos, lo cual ocurre en las opciones de compra

de agua al municipio de Celaya. De esta forma las opciones que involucran la construcción de una PTAN obtienen un menor puntaje dentro de este subaspecto.

Para los aspectos **económicos financieros**, se puede analizar lo siguiente:

-En cuestión de inversión en terrenos, edificios, materiales y equipos, las opciones de compra de agua a la PTAN Irapuato obtienen mayor puntaje, ya que manejan un número menor de equipos. Pero en cuestión de materias primas, se tiene un mayor puntaje en la compra de agua a Celaya, ya que el precio ofrecido por el municipio de Celaya para su agua es mucho más barato, debido a que el agua no tiene ningún pretratamiento. Fuera de estos factores, se le concedió un mayor peso al destino de inversión, debido a que refleja la ganancia que tiene PEMEX-Refinación al invertir en su propia infraestructura. Por tal motivo, las opciones que plantean la construcción de una nueva PTAN en la refinería Ing. Antonio M. Amor obtienen un mayor puntaje en este subaspecto, debido que se invertirá más en infraestructura y menos en la compra de agua.

-Los parámetros de rentabilidad del proyecto indican que la opción que económicamente reeditarán en mayor medida será la compra de agua a la PTAN Irapuato aunado a la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor. Esta opción tiene una TIR del 29.06%, la cual es mayor que el resto de las opciones planteadas, lo que indica que es la opción más rentable. Lo anterior concuerda con los valores obtenidos para el resto de los parámetros, ya que indican la misma conclusión. Su VPN también es el mayor que el de todas las opciones, lo cual al igual que el índice de rentabilidad, indica que las ganancias obtenidas serán mayores que en el resto de las opciones, ya que se obtendrá el doble de lo invertido en el proyecto. El tiempo de recuperación de lo invertido es menor con respecto al resto de las opciones. Bajo condiciones desfavorables, esta opción mantiene su liderazgo, obteniendo TIR's más elevadas en situaciones críticas, que el resto de las opciones en condiciones normales. Por todo lo anterior, dentro de este subaspecto, la opción de compra de agua a la PTAN Irapuato más la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, es determinadamente la opción más rentable para PEMEX-Refinación.

Los **aspectos plausibles** nos muestran cual de las opciones puede beneficiar en mayor medida a la sociedad y al medio ambiente:

-Dentro de los criterios macro-económicos y sociales, las opciones de compra de agua negra a Celaya obtuvieron un mayor puntaje, debido a que al tratar el agua negra que es desecha actualmente de esta manera, se ayudará al municipio de Celaya, al medio ambiente y a los proyectos nacionales de cuidado de agua. De tal manera que dentro de este subaspecto las opciones de compra de agua al municipio de Celaya son social y ambientalmente más rentables.

-Dentro de los criterios tecnológicos de las opciones analizadas, la opción de compra de agua negra al municipio de Celaya junto con la modernización de la PTAR obtiene un mayor puntaje debido a que dentro de su operación y construcción afecta en menor medida al medio ambiente, por lo que también brinda ventajas sociales. Debido a que el agua a tratar por esta opción es agua negra que actualmente se descarga sin previo tratamiento, esta opción ayuda en mayor medida al ambiente aunado al hecho de que también plantea un mayor aprovechamiento del agua en la refinería Ing. Antonio M. Amor.

El porcentaje asignado a cada uno de los aspectos evaluados tiene diferente valor, por lo que el puntaje final está basado en los factores clave de cada una de las opciones propuestas, dando por resultado la elección de la opción más adecuada, valorada bajo diferentes puntos de vista.

Con base en estos los resultados analizados, en conjunto la opción que ofrece mayores beneficios es la opción de la compra de agua a la PTAN Irapuato para su tratamiento en un tren de tratamiento ubicado en la refinería Ing. Antonio M. Amor junto con la modernización de la PTAR ubicada en la misma refinería.

6 CONCLUSIONES FINALES

De acuerdo a los resultados obtenidos, la opción más factible, es la compra de agua tratada a la PTAN Irapuato para un posterior tratamiento en la refinería Ing. Antonio M. Amor, en conjunto con la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor. Debido a que esta es la opción que presenta mayores ventajas (puntaje) a la refinería Ing. Antonio M. Amor, principalmente dentro de los aspectos económicos y técnicos.

El método matricial de evaluación de opciones brindó un correcto análisis de las opciones evaluadas, debido a que realiza la evaluación de cada una de las opciones mediante la apreciación particular de diferentes aspectos. El método matricial realiza múltiples evaluaciones basadas en diferentes criterios sobre una sola propuesta para después unificar estas evaluaciones y ofrecer un puntaje final de dicha propuesta, después de lo cual compara los puntajes finales de diferentes propuestas eligiendo así la mejor de entre ellas, dicha elección es objetiva y orientada hacia los aspectos de mayor interés para el evaluador o en este caso para la refinería Ing. Antonio M. Amor. Por tal motivo la propuesta de suministro de agua planteada en este trabajo como la mejor opción a realizarse, cubre con las necesidades planteadas por la refinería Ing. Antonio M. Amor, además de brindar los mayores beneficios dentro de los aspectos económicos y tecnológicos.

En cuanto a los aspectos técnicos, esta opción plantea la implementación y operación de un tren de tratamiento de agua, que en comparación con el manejo de una PTAN (como se planea en las opciones de compra de agua negra a Celaya) es más sencillo de operar, además de que requiere de un menor número de personal para su correcta operación. Aunado a esto, debe hacerse notar que debido a la situación actual de la PTAN Irapuato (en operación) y a que existe un estudio previo de modernización para la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, la opción de suministro de agua propuesta a realizarse, se puede llevar a cabo en un tiempo relativamente corto, ya que sólo requiere de un estudio sobre los equipos de tratamiento a implementarse en la refinería Ing. Antonio M. Amor. Dentro de las ventajas ya mencionadas que proporciona la propuesta de suministro de agua seleccionada, se encuentra el hecho de que la capacidad de bombeo requerida para transportar el agua de la PTAN Irapuato a la

refinería Ing. Antonio M. Amor y el consumo de energía de esta propuesta es menor que el obtenido para el resto de las opciones.

En el aspecto económico, esta opción obtuvo los mejores índices de rentabilidad, indicando que se obtendrán ganancias de más del doble de lo invertido. La recuperación de la inversión inicial se puede lograr en un periodo corto de tiempo (3 años, 4 meses), el cual es el periodo de tiempo más corto obtenido de entre las opciones analizadas. Principalmente esto se debe a que si bien se invierte en la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, esta inversión no resulta demasiado elevada, además de que el tren de tratamiento planteado por la opción propuesta a realizar, tiene una menor capacidad que el planteado en la opción de compra de agua tratada a la PTAN Irapuato sin modernización de PTAR. Debe resaltarse que dentro de esta opción se invierte en la infraestructura de la refinería Ing. Antonio M. Amor, aspecto que es fundamental para el beneficio de la institución.

Los principales motivos por los cuales se propuso a la opción de compra de agua tratada a la PTAN Irapuato más la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor como la mejor opción ha llevarse a cabo, son los aspectos tecnológicos y económicos, ya que en cuestión de aspectos plausibles (ambientales y sociales), no se obtuvieron resultados sobresalientes para esta opción. Sin embargo, la opción elegida brinda beneficios ambientales y sociales como lo son el tratamiento de agua de baja calidad de la PTAN Irapuato, que actualmente se descarga a los ríos; las plazas de trabajo generadas en la construcción del tren de tratamiento propuesto y modernización de la PTAR; la reducción de las descargas de agua de los mantos acuíferos y demás beneficios ya mencionados (análisis de resultados) que trae consigo la realización de esta opción.

En base a los resultados obtenidos, se cumplió con el objetivo general del proyecto, el cual era encontrar una opción para sustituir el actual suministro de agua a la refinería Ing. Antonio M. Amor, el cual fuera ambiental y tecnológicamente viable para la refinería Ing. Antonio M. Amor. Ya que por medio de la opción elegida se logrará disminuir sensiblemente la extracción de agua de pozos (se extraerá agua de pozos para seguir cubriendo los requerimientos del hospital de PEMEX, de la colonia PEMEX, de proceso, de áreas administrativas, etc.) que actualmente suministra agua cruda a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

De llevarse acabo la opción de suministro de agua propuesta en la refinería Ing. Antonio M. Amor, es posible utilizar la actual red de suministro de agua cruda de pozos, para suministrar el agua tratada de la PTAN Irapuato a las TE y UDA's, mientras que el agua tratada por la PTAR modernizada, puede seguir suministrándose por medio de la actual red de suministro de agua de PTAR a TE.

En base al estudio realizado, la opción propuesta de compra de agua tratada a la PTAN Irapuato en conjunto con la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, cumple con todos los requerimientos exigidos por la refinería Ing. Antonio M. Amor para sus actuales procesos y futura implementación del PCC. Aunado a lo anterior, esta opción de suministro de agua representar una excelente opción de inversión para PEMEX-Refinación, ya que representa un ahorro económico considerable en el suministro de agua cruda a la refinería Ing. Antonio M. Amor.

La propuesta de compra de agua tratada a la PTAN Irapuato en conjunto con la modernización de la PTAR de la refinería Ing. Antonio M. Amor, posee una serie de aspectos capaces de ayudar al mejoramiento social y ambiental de las comunidades aledañas a la refinería Ing. Antonio M. Amor, contribuyendo así, al desarrollo de una industria social y ambientalmente responsable.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Baron C. Case: water management project for the use of reclaimed wastewater and desalted seawater for the “Antonio Dovali Jaime” Refinery, Salina Cruz, Oaxaca, México. *Wat. Sci. Tech*, 2000. pp. 5-6, 1-7.
- Cohen A. J. y Ross A. H. Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attribution to Selected Major Risk Factors. En: Vol. 2. Chapter 17. *Urbana air pollution*, 2004. pp. 1353-1361.
- Comisión estatal de aguas (CEA) Querétaro. Manual para las Instalaciones de Agua Potable, Agua Tratada, Drenaje Sanitario y Drenaje Pluvial de los Fraccionamientos y Condominios de la Cd. de Querétaro y Zona Conurbana, 2007. pp. 27.
- Davis M. L. y Cornwell D. A. *Introduction to Environmental Engineering*. 3a ed. Ed. McGraw Hill, New York, 1998. pp 52-62.
- Davis M. L. y Masten S. J. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. Ed. McGraw Hill. New York: John Wiley & Sons, 1998. pp. 405.
- DGCOH (Dirección General de Construcción y Operación Hidráulicas). Análisis de factibilidad técnica, económica y operacional de aplicación de normas para el reuso de aguas residuales tratadas en el Distrito Federal. México, 1987. pp. 102-105
- Duyvesteijn C.P.T.M. *Water re-use in an oil refinery: Desalination*, 1998. pp. 357-358.
- EPA, *Wastewater Technology Fact Sheet. Fine bubble aeration (EPA 832-F-99-065)*, 1999. Disponible en: <http://www.epa.gov/owm/mtb/fine.pdf>
- Gary, J. y Handwerk G. *Petroleum Refining Technology and Economics*. Ed: Marcel Dekker. USA, 2001. pp. 441.
- Gioli P. y Silingardi G. E. High quality water from refinery waste. 1987. pp. 271-282.
- Horan N. J. *Biological Wastewater Treatment Systems Theory and Operation*. Ed. John Wiley & Sons, 1991. pp.310.
- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) y Petróleos Mexicanos (PEMEX). Evaluación de Tecnologías en la Industria de Refinación del Petróleo, IMP Subdirección de Transformación Industrial. México, 1998. En: Capítulo 3.
- Jiménez, B. E. *La Contaminación Ambiental en México*. 2da ed. Edit. Limusa. México 2002. pp. 925.

- Kraus, R. S. Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo. Edit. Chantal Dufresne, BA. En: Capitulo 78, Petróleo y gas natural, 1998. pp. 2-8
- Marwan M. Use of Degraded Water Sources as Cooling Water in Power Plants. En: California Energy Commission, Final Report, 2003. pp 2-3.
- Metcalf & Eddy. Ingeniería de aguas residuales. En: Tratamiento vertido y reutilización. 3ª ed. Tomo 1. Edit. McGraw-Hill, 1996. pp. 204-220
- Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering, Treatment and reuse. 4a ed. Edit. McGraw-Hill, 2003. pp. 320-326
- Nemerow L. N. Aguas Residuales industriales. Ed. H.Blume, 1977. pp. 83-86, 91-93, 97-100, 108-118.
- Nesicolaci, M. The RO Renaissance: Why it thrives in the Marketplace. Water Conditioning and Purification, 2004. pp. 38-40
- Quero M. H. Comparativa de ampliación E.D.A.R mediante reactor biológico convencional o MBR. En: Anexo A: Membranas (Ultrafiltración). Universitat Politècnica de Catalunya, 2007. pp. 4-12.
- Randall W. Process Equipment Cost Estimating by Ratio and Proportion, CPE, 2007. pp. 52-60
- Rogozen, M.B. Emission Characteristics of Cooling Towers Using Reclaimed Wastewater in California. ARB Contract No. A8-126-31, 1981. Disponible en: www.arb.ca.gov/research/abstracts/a8-126-31.htm;
- Sawyer C. y McCarty P. Química para Ingeniería Ambiental. Ed. 4ta Cuarta. Edit. Mc. Graw Hill, Colombia, 2001. pp. 713.
- Shu-Hai Y. The potential for the recovery and reuse of cooling water in Taiwan. En: Resources, Conservation and Recycling, Vol. 26, 1999. pp. 53-62.
- Tebbutt. Fundamentos de control de la Calidad del agua. Ed. 3er. Edit. Limusa, 1999. pp 106.
- Teodosiu C. y Kennedy M. D.(1999). Evaluation of secondary refinery effluent treatment using ultrafiltration membranes: Water Research, 1999. pp. 2173-2180.
- WEF, Water Environment Federation. Manual of Practice No. 8 (MOP-8): Design of Municipal Wastewater Treatment Plants. En: Vol. 1 y 2. the Water Environment Federation, 1992.

- WPCF, Water Pollution Control Federation. Manual of Practice 11 (MOP-11). En: Operation of Wastewater Treatment Plants. 1990.

8 REFERENCIAS ELECTRONICAS

- Agüera, J. A. [en línea]. Depuración biológica en el sector del Refino. Seminario “Operación de depuradoras biológicas industriales”, CEPESA, 2005. (citado 05 diciembre 2007). Disponible en: [http://www.abellolinde.es/International/Web/LG/ES/likelges.nsf/0/170168e85040af28c12570d7003252a3/\\$FILE/Presentaci%C3%B3n%20Cepsa.pdf](http://www.abellolinde.es/International/Web/LG/ES/likelges.nsf/0/170168e85040af28c12570d7003252a3/$FILE/Presentaci%C3%B3n%20Cepsa.pdf)
- Banco de México [en línea]. (citado 25 febrero 2008). Disponible en: <http://www.banxico.org.mx/PortalesEspecializados/inflacion/inflacion.html>
- DGCOH, Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. En: Normatividad. Libro 2. Tomo II, 1989 (citado 15 mayo 2008). Disponible en: <http://www.obras.df.gob.mx/normatividad/index.html>
- Excel Water. Intercambio Iónico, 2007 (citado 14 abril 2008). Disponible en: <http://www.excelwater.com/spa/b2c/ix.php>. Carbón Activado, 2007 (citado 15 abril 2008). Disponible en: http://www.excelwater.com/spa/b2c/water_tech_10.php
- Información proporcionada por PEMEX-Refinación, 2008 (citado 25 noviembre 2007- 05 junio 2008). Disponible en: Reportes internos de la Facultad de Química, UNAM.
- Reportes internos Facultad de Química, UNAM, 2008 (citado de 25 noviembre 2007- 05 junio 2008). Disponible en: Reportes internos Facultad de Química, UNAM.
- Lesikar, B. J. Promotores Especialistas de Ingeniería Agrícola, el Sistema Universitario Texas A&M: Filtros de Arena (citado 15 febrero 2008). Disponible en: <http://www.p2pays.org/ref/12/11601.pdf>
- Lenntech. Tren de tratamiento de agua residual básico, 1998-2007 (citado 28 enero 2008). Disponible en: http://www.lenntech.com/waste_water.htm
- NOM-001-SEMARNAT-1996 (citado 05 noviembre 2007). Disponible en: http://mx.geocities.com/r_millan_/Nom-001.doc

- NOM-86-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (citado 05 noviembre 2007). Disponible en:[http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/2006/30012006\(1\).pdf](http://www.ordenjuridico.gob.mx/Federal/PE/APF/APC/SEMARNAT/Normas/Oficiales/2006/30012006(1).pdf).
- SEMARNAT, PEMEX-Refinación, INA. Estudio de evaluación socioeconómico del proyecto integral calidad de combustibles, 2006 (citado 16 noviembre 2007). Disponible en:http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/download/azufre_comb_est_costo_bene_2006.pdf
- Sierra. M. E., SENER. Reducción de Azufre en Combustibles, 2005 (citado 16 junio de 2008). Disponible en: http://www.swisscontact.org.pe/PRAL/07_marielena_sierra.pdf
- American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA), Water Environment Federation (WEF), 2006 (citado 22 enero 2008). Disponible en: <http://www.standardmethods.org/ViewArticle.cfm?articleID=72>
- Sulzer. Cotización bombas, 2005 (citado 22 febrero 2008). Disponible en: Reportes internos de la Facultad de Química, UNAM.
- TUVANSA. Cotización 5 septiembre 2007 (citado febrero 2008). Disponible en: Reportes internos de la Facultad de Química, UNAM.