

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA  
REUTILIZACION Y REDISTRIBUCION DEL AGUA DE USO INDUSTRIAL  
EN UNA REFINERIA**

**HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA  
FABIAN ANDREY DIAZ MATEUS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

**2004**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA LA  
REUTILIZACION Y REDISTRIBUCION DEL AGUA DE USO INDUSTRIAL  
EN UNA REFINERIA**

**HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA  
FABIAN ANDREY DIAZ MATEUS**

Trabajo de Grado como requisito parcial  
para optar al título de ingeniero químico

**DIRECTOR**

**M. Sc CRISOSTOMO BARAJAS**

**CODIRECTOR**

**M. Sc JORGE ENRIQUE FORERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA**

**2004**

## RESUMEN

**TÍTULO:** Desarrollo de una herramienta computacional para la reutilización y redistribución del agua de uso industrial en una refinería.

**AUTORES:** HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA  
FABIAN ANDREY DIAZ MATEUS\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Reutilización, Redistribución, Agua industrial, Refinería.

### DESCRIPCIÓN:

El uso del agua es fundamental en el proceso de refinación del crudo. Las refinerías presentan innumerables problemas de contaminación en sus vertientes y de disponibilidad de agua, por lo que éstas se ven obligadas a llevar a cabo costosos procesos para el tratamiento de agua industrial y de desecho. Las refinerías más eficientes en el mundo consumen por debajo de 0,5 barriles de agua por barril refinado de petróleo; en nuestro caso particular, nuestras refinerías consumen más de 1 barril de agua por barril de petróleo refinado.

La Gerencia del Complejo Industrial Barrancabermeja (GCB) posee una gran cantidad de efluentes que podrían ser reutilizados. El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar una herramienta computacional que determine, mediante técnicas de optimización, las mejores opciones de reutilización y redistribución posibles de agua industrial, entre los efluentes seleccionados de la GCB.

Como resultado del desarrollo de este proyecto se demostró la posibilidad de reducir hasta en un 20% el consumo de agua clarificada, en un 57% el consumo de agua suavizada y hasta en un 64% la producción de agua residual; para las plantas seleccionadas. Lo que representaría, además de un considerable ahorro en dinero, un incontable beneficio ecológico para la laguna San Silvestre y el río Magdalena.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Programa: Ingeniería Química. Director: M. Sc Crisóstomo Barajas

## ABSTRACT

**TITLE:** Computational tool development for refinery industrial water reutilization and redistribution\*

**AUTHORS:** HERMES ENRIQUE CASTELLANOS IBARRA  
FABIAN ANDREY DIAZ MATEUS\*\*

**KEYWORDS:** Reutilización, Redistribución, Agua industrial, Refinería.

### DESCRIPTION:

The use of water is fundamental in crude refining processes. Refineries present countless effluent contamination and water availability problems that force them to carry out expensive industrial water treatment processes and wastewater treatment. The most efficient refineries in the world consume under 0,5 barrels of water per crude refined barrel, in Colombia; our refineries consume over 1 barrel of water per crude refined barrel.

The Industrial Complex of Barrancabermeja (GCB) possesses a large amount of reusable effluents. The objective of this work consists of developing a computational tool to determine, through optimization techniques and between the selected effluents of the GCB, the best possible industrial water reutilization and redistribution possible options.

As result of this work, the possibility of reduce up to 20% the clarified water consumption, up to 57% the softened water consumption and up to 64% the wastewater production; has been demonstrated respectively to the selected plant processes. Besides providing a sizable economic advantage, these results present a countless ecological benefit for the San Silvestre Lake and the Magdalena River.

---

\* Graduate project

\*\* Faculty of Chemicals-Physycal Engineerings. Program: Chemical Engineering. Director: M. Sc Crisóstomo Barajas

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. AGUAS INDUSTRIALES	3
1.1 FACTORES GENERALES DE CALIDAD	3
1.2 CONTAMINANTES	3
1.2.1 Dureza	3
1.2.2 Sílice	4
1.2.3 Hierro, Manganeseo y Aluminio	4
1.2.4 Sodio y Potasio	5
1.2.5 Alcalinidad	5
1.2.6 Sulfatos	5
1.2.7 Cloruros	6
1.2.8 Gases Disueltos	6
2. EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SOBRE LAS OPERACIONES INDUSTRIALES	9
2.1 AGUA PARA GENERACIÓN DE VAPOR	9
2.2 ENFRIAMIENTO EN PROCESOS INDUSTRIALES	10
3 TRATAMIENTOS PARA EL AGUA DE PROCESO	13
3.1 TRATAMIENTO FÍSICO	13
3.1.1 Sedimentación	13
3.1.2 Colado y filtrado	15
3.1.3 Desgasificación	15
3.1.4 Destilación	16
3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO	18

3.2.1	Precipitación	18
3.2.2	Suavizamiento	19
3.2.3	Intercambio iónico	21
3.2.4	Reacciones de oxidación	23
4.	AGUAS RESIDUALES CARACTERISTICAS DE UNA REFINERIA	24
4.1	AGUA DESALINIZADORA	24
4.1.1	Composición de los efluentes de desalado	25
4.2	CONDENSADOS	25
4.2.1	Condensados de destilación	25
4.2.2	Condensados agrios	26
4.2.3	Condensados de calentamiento de productos	27
4.3	AGUAS ACEITOSAS	27
4.3.1	Aguas aceitosas corrientes	28
4.3.2	Aguas aceitosas accidentales	28
4.4	SODA GASTADA	28
5.	AGUAS RESIDUALES EN LA GCB	29
5.1	AGUAS ÁCIDAS	29
5.2	AGUAS AGRIAS	30
6.	PROCESOS TIPICOS DE REGENERACION DE AGUAS EN UNA REFINERIA	32
6.1	TRATAMIENTO DE AGUAS AGRIAS	32
6.1.1	Despojamiento	32
6.1.2	Oxidación	33
6.2	TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS	33
7.	TECNICAS DE REUTILIZACION Y MINIMIZACION DE AGUA RESIDUAL	35
7.1	“WATER PINCH”	35
7.1.1	La tecnología “Water Pinch”	35
7.2	PRINCIPIOS GENERALES PARA LA REDUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL	37

8. PRINCIPIOS DE LA OPTIMIZACION DEL USO DE AGUA INDUSTRIAL	39
8.1 REUTILIZACIÓN DIRECTA DE LAS AGUAS DE PROCESO	39
8.2 DISEÑO DE REDES INDUSTRIALES DE AGUAS DE PROCESO	40
8.3 REGENERACIÓN Y RECICLO DE AGUAS DE PROCESO	41
8.4 REDUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL EN SISTEMAS CON MÚLTIPLES CONTAMINANTES	42
8.5 REDUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA	43
9. DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE USO DE AGUA INDUSTRIAL	47
9.1 ANÁLISIS DE PROCESOS Y EFLUENTES EN LA GCB	47
9.1.1 Plantas de agua	48
9.1.2 Toppings	48
9.1.3 Cracking	48
9.1.4 Petroquímica	49
9.1.5 Procesos de regeneración	49
9.1.6 Contaminantes	51
9.2 ECUACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUA INDUSTRIAL	54
9.2.1 Nomenclatura	54
9.2.2 Procesos	55
9.2.3 Tratamientos de agua	56
9.2.4 Función objetivo	57
10. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN	60
10.1 OPTIMIZACIÓN EN FUNCION DE LOS COSTOS DE AGUA	60
10.2 OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y TRANSPORTE	67
11. ANALISIS DE RESULTADOS	76
11.1 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EN FUNCION DE LOS COSTOS DE AGUA	76

11.1.1 Reducción en el consumo de agua clarificada y suavizada	76
11.1.2 Factibilidad de la reutilización	77
11.2 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y TRANSPORTE	79
11.2.1 Reducción en el consumo de agua clarificada y suavizada	79
11.2.2 Factibilidad de la reutilización	80
12. BALANCE ECONÓMICO DE LOS RESULTADOS	82
12.1 OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA	82
12.2 OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y TRANSPORTE	83
13. DESCRIPCION DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN	86
13.1 INGRESO DE DATOS	86
13.2 EJECUCIÓN DE LA HERRAMIENTA	87
CONCLUSIONES	89
RECOMENDACIONES	91
LISTA DE REFERENCIAS	93
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	95

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de la dureza.	4
Tabla 2. Límites de concentración de materiales en el agua para calderas.	10
Tabla 3. Concentración permitida para recirculación de aguas de torres de enfriamiento.	12
Tabla 4. Composición característica de una purga de torre de enfriamiento y una purga de caldera.	12
Tabla 5. Producción y composición de condensados en procesos de refinación	27
Tabla 6. Características del agua utilizada en la planta de ácido.	29
Tabla 7. Efluentes seleccionados con sus características.	50
Tabla 8. Costo del agua en la GCB	57
Tabla 9. Costo de la tubería de acero al carbono cédula 40.	59
Tabla 10. Resultados de la optimización en función de los costos de agua.	60
Tabla 11. Resultados de la optimización en función de los costos de agua y transporte	68
Tabla 12. Consumo de agua industrial y producción residual después de la optimización en función de los costos de agua.	76
Tabla 13. Consumo de agua industrial y producción residual después de la optimización en función de los costos de agua y transporte.	79
Tabla 14. Costo del agua utilizada actualmente en la GCB.	83
Tabla 15. Costo del agua utilizada actualmente en la GCB incluyendo costos de transporte.	84
Tabla 16. Plan de pagos de la inversión para transporte de agua	85

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de bloques de la reutilización directa	40
Figura 2. Diagrama de bloques para un diseño de redes en un sistema con un contaminante.	41
Figura 3. Diagrama de bloques de procesos con regeneración y reciclo.	42
Figura 4. Esquema de minimización de agua en una planta $x$ con un solo contaminante, para un proceso de $n$ plantas.	45
Figura 5. Panel de ingreso de datos de la herramienta computacional.	87

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. Datos empleados en el modelo computacional de optimización	95
ANEXO 2. Cálculo de los costos de transporte de agua	100
ANEXO 3. Posible ubicación del punto de distribución en la GCB	103
ANEXO 4. Microsoft Excel Solver	104

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los distintos países dependen del petróleo y sus productos; las sociedades industriales modernas lo utilizan sobre todo para lograr un grado de movilidad por tierra, mar y aire impensable hace sólo 100 años. Sin embargo, en los últimos años ha descendido la disponibilidad mundial de esta materia, y su costo relativo ha aumentado. Razón por la cual el desarrollo de tecnologías en el área de la refinación se ha hecho indispensable hoy en día, con el objeto de darle un mayor aprovechamiento y valor agregado al crudo.

El empleo de agua es fundamental en el proceso de la refinación que sería imposible si no se contara con una disponibilidad abundante de ésta. Ahora el empleo de agua en la refinación trae consigo problemas de contaminación y las leyes ambientales actuales obligan a las refinerías a llevar a cabo costosos procesos de descontaminación antes de verterlas nuevamente al ambiente. Razón por la cual un eficaz empleo del agua se ha vuelto una de las principales tareas de la industria de la refinación del petróleo.

Uno de los factores con los cuales se puede medir la eficiencia de una refinería es el consumo de agua. Las refinerías más eficientes en el mundo consumen por debajo de 0,5 barriles de agua por barril refinado de petróleo; siendo éste el ejemplo a seguir por las demás refinerías. En nuestro caso particular, nuestras refinerías consumen más de 1 barril de agua por barril de petróleo refinado.

El complejo industrial Barrancabermeja genera cerca de 4000 GPM\* de aguas residuales, las cuales se envían a la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, para su tratamiento y disposición final. La totalidad de ésta agua se colecta en el sistema de alcantarillado de aguas aceitosas, sin embargo no todos los efluentes industriales que se generan en las plantas de proceso corresponden a aguas aceitosas; mediante la reutilización y redistribución de éstas corrientes, se puede optimizar el manejo del agua en el complejo.

La disminución del consumo de agua industrial en el Complejo Industrial Barrancabermeja, representaría una importante disminución en los recursos empleados para tratamiento de aguas industriales y de desecho; además del incontable beneficio ecológico que representaría para la laguna San Silvestre y el río Magdalena.

El propósito de este trabajo radica en el desarrollo un modelo computacional para la optimización del empleo de agua industrial en una refinería.

La importancia del desarrollo de este proyecto para ECOPETROL S.A. dentro del marco del Programa de Optimización de Refinerías (POR) radica en la obtención de resultados debidamente soportados que demuestran la posibilidad de reducir notablemente el consumo de agua y de esta manera hacer una refinería mas eficiente.

---

\* Galones por minuto

## **1. AGUAS INDUSTRIALES**

### **1.1 FACTORES GENERALES DE CALIDAD**

La concentración total de sólidos disueltos, la concentración de los contaminantes más importantes; como por ejemplo la dureza, determinan si el agua es, o no, apropiada para aplicaciones industriales específicas.

Generalmente las aguas superficiales, de ríos, lagunas y ciénagas entre otros, son más suaves y están menos concentradas que las subterráneas; sin embargo, la dureza y los sólidos disueltos en las aguas superficiales varían mucho durante el año y en muchas corrientes lo hacen de un día para otro. Las aguas superficiales en su mayoría suelen ser turbias; algunas lo son en forma excesiva debido a las lluvias o precipitaciones. Con algunas excepciones, la mayoría de las aguas deben filtrarse antes de utilizarlas para los abastecimientos públicos o en la industria.

### **1.2 CONTAMINANTES**

#### **1.2.1 Dureza**

En muchas industrias, la dureza constituye la base principal para clasificar las aguas que reciben. La dureza del agua es una característica que se expresa como la concentración total de calcio y magnesio. Aunque otros constituyentes tales como el hierro, el manganeso y otros cationes polivalentes también contribuyen a la dureza, casi siempre tienen concentraciones tan pequeñas que en realidad no afectan la dureza del agua industrial.

La dureza se puede dividir en dos tipos: la de carbonatos y la de no carbonatos. La de carbonatos es aquella parte de la dureza del agua que se debe a los carbonatos y los bicarbonatos que tenga. El resto de la dureza se denomina la de no carbonatos. La de carbonatos rara vez impide utilizar el agua para la industria ya que, en caso de ser excesiva, se puede reducir o eliminar de un modo sencillo y poco costoso. Por otro lado, la dureza de no carbonatos, sobre todo cuando el anión predominante es el sulfato, puede dar como resultado la formación de escamas duras en las calderas y en otras partes de los equipos de intercambio de calor. Este tipo de dureza es más costosa y difícil de eliminar.

**Tabla 1.** Clasificación de la dureza

<b>Rango de dureza (mg/L) ó (ppm)</b>	<b>Clasificación descriptiva</b>
1 a 60	Suave
61 a 120	Moderadamente dura
121 a 180	Dura
Superior a 180	Muy dura

### **1.2.2 Sílice**

Las concentraciones de sílice en el agua varían entre 1 ppm y 75 ppm y alcanzan promedios de 5 a 15 ppm. En ciertas condiciones, la sílice forma escamas duras en las calderas, y en las hojas de las turbinas.

### **1.2.3 Hierro, Manganeso y Aluminio**

En las aguas superficiales el contenido de hierro, manganeso y aluminio varía de 1,01 ppm a 0,5 ppm. La materia orgánica puede formar compuestos complejos con estos metales, lo cual da lugar a un aumento de las concentraciones totales. En muchos procesos industriales, el hierro y el manganeso son particularmente perjudiciales debido a que interfieren en forma indeseable en los productos manufacturados.

#### **1.2.4 Sodio y Potasio**

Cuando las concentraciones del sodio y el potasio son bajas no afectan el uso industrial del agua. El contenido de sodio del agua varía en un amplio margen, desde menos de 5 ppm en agua dulce, hasta muchos miles de miligramos por litro (partes por millón) en las aguas salobres. El agua de mar contiene alrededor de 10700 ppm de sodio. El potasio por lo regular, se encuentra en el agua dulce, pero en concentraciones bajas que rara vez sobrepasan el nivel de 10 ppm.

#### **1.2.5 Alcalinidad**

La alcalinidad de los abastecimientos de agua casi siempre indica, que ésta contiene el ión de bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  aunque también pueden existir carbonatos,  $\text{CO}_3^-$  y en algunos casos el hidróxido,  $\text{OH}^-$  debido a la contaminación con desechos alcalinos. La alcalinidad del agua usualmente se debe a la presencia de carbonato de calcio,  $\text{CaCO}_3$ . Prácticamente todas las aguas naturales tienen alcalinidad a menos que se neutralicen mediante el ácido de efluentes industriales. La alcalinidad se relaciona con la capacidad amortiguadora o de tampón del agua; es decir, la capacidad que tiene el agua para recibir ácidos sin, reducir sustancialmente su pH. No obstante, esto puede ocasionar problemas en ciertos procesos industriales.

#### **1.2.6 Sulfatos**

Las concentraciones de sulfato varían mucho en las aguas naturales. El sulfato puede derivarse de la lixiviación de los depósitos de yeso, anhidrita y esquisto, o de la oxidación de los sulfuros. Las aguas de regiones áridas o semiáridas, pueden contener cantidades relativamente grandes de sulfato. Cuando el sulfato se combina con el calcio, forman escamas que originan graves problemas en los intercambiadores de calor y que son difíciles de eliminar.

### 1.2.7 Cloruros

El cloruro se encuentra en todas las aguas naturales en concentraciones muy variadas. Las corrientes de regiones áridas o semiáridas pueden contener varios cientos de mg/L de cloruro. El agua de mar contiene más o menos 19000 ppm de cloruro y otras aguas salobres llegan a contener concentraciones aún mayores.

Las concentraciones de cloro inferiores a 60 ppm no tienen efectos perjudiciales en la mayoría de las aplicaciones industriales, y los abastecimientos de agua con concentraciones mayores se utilizan sin grandes problemas; aunque se debe tener en cuenta no usar aguas con un alto contenido de cloruros porque estas aceleran la corrosión en la superficie de los metales.

### 1.2.8 Gases Disueltos

Los gases disueltos, incluyendo el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), el oxígeno ( $\text{O}_2$ ), el sulfuro de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{S}$ ) o el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) a menudo tienen importancia, dependiendo del uso final que se le dé al agua. Aunque algunos de los anteriores gases pueden combinarse para formar iones, éstos generalmente se consideran como gases disueltos, ya que pueden separarse como gases, por calentamiento o agitación, y no dejan residuos al evaporarse. Los gases deben eliminarse del agua que se destina para ciertos usos industriales, sobre todo cuando se usa para la generación de vapor.

- **Dióxido de Carbono.** El dióxido de carbono es uno de los subproductos de la descomposición aeróbica y anaeróbica de la materia orgánica, además los ácidos de origen natural, o bien, provenientes de la contaminación, liberan dióxido de carbono de los bicarbonatos. Debido a esto la mayor parte del dióxido de carbono del agua se deriva de estas fuentes. El aire solo contiene aproximadamente 0,04% de dióxido de carbono, pero la concentración de éste en el agua que esta en equilibrio

con el aire se acerca a 0,7 ppm. Las corrientes contienen por lo general concentraciones pequeñas de dióxido de carbono; pero algunas aguas subterráneas contienen 20 ppm o más en su medio ambiente natural.

- **Oxígeno Disuelto.** El oxígeno disuelto varía entre 3 y 12 ppm en aguas superficiales; y las contaminadas pueden contener menos de 3 ppm, llegando incluso en algunos casos a cero.
- **Sulfuro de Hidrógeno.** El sulfuro de hidrógeno rara vez se encuentra en aguas superficiales, a menos que estén contaminadas. Con una concentración de 0,1 ppm, el agua ya tiene un olor perceptible.
- **Amoníaco.** El amoníaco varía de 0,0 ppm a 4 ppm aproximadamente y se produce naturalmente tanto en aguas superficiales como en subterráneas. El amoníaco se debe también a la presencia de aguas negras o desechos industriales.
- **pH.** La concentración, del ión de hidrógeno o pH (que es una medida de la actividad del ión de hidrógeno) se usa para indicar tanto la acidez como la alcalinidad del agua. El pH de casi todas las aguas superficiales varía entre 6 y 8. Las aguas que contienen ácidos minerales libres que provienen de los drenajes o de otros desechos industriales, pueden tener valores de pH inferiores a 4, dependiendo de la capacidad amortiguadora del agua receptora. Algunas aguas subterráneas poseen valores de pH superiores a 8 y algunas inferiores a 5, pero la mayoría están entre 6 y 8. En muchas aplicaciones industriales los valores de pH del agua determinan de manera decisiva, si ésta puede usarse o no.
- **Turbidez.** La turbidez es una característica de casi todas las aguas superficiales, debido a las lluvias y a la erosión de la superficie terrestre,

estas aguas contienen partículas disueltas de materia en suspensión. La turbidez también puede encontrarse en el agua tratada si ésta fue indebidamente estabilizada o filtrada. Las aguas subterráneas rara vez son turbias; sin embargo, algunas son químicamente inestables y pueden volverse turbias al entrar en contacto con la atmósfera. El color se debe casi siempre a la presencia de materia orgánica la cual puede provenir de la vegetación en descomposición o de desechos municipales o industriales. En casi todas las aguas superficiales se observa la presencia de microorganismos como bacterias, hongos y algas que generalmente ocasionan muchos problemas.

El agua es esencial, prácticamente en todas las operaciones industriales, pero solo en raras ocasiones es posible utilizarla tal y como se extrae de un río, un lago o un pozo; si no se toman las precauciones necesarias, las impurezas que contiene a causa de la contaminación natural o artificial pueden afectar gravemente tanto a los equipos como a los productos.

## **2. EFECTO DE LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA SOBRE LAS OPERACIONES INDUSTRIALES**

Un contaminante específico puede ser perjudicial en diversas operaciones industriales. Por ejemplo, los sedimentos producidos por la erosión generalmente deben eliminarse del agua que se utiliza en las operaciones de proceso, en los sistemas de enfriamiento de equipo, excepto en los de un solo paso y en calderas para generación de vapor. Otros contaminantes pueden considerarse inofensivos, excepto en circunstancias especiales. Así por lo general se presta poca atención al ión cloruro mientras su concentración no pase de algunos cientos de miligramos por litro. No obstante, se le elimina del agua que se utiliza en los reactores, ya que acelera el agrietamiento del acero inoxidable debido a la corrosión por esfuerzos.

### **2.1 AGUA PARA GENERACIÓN DE VAPOR**

En el agua de alimentación de una caldera que produce vapor a una presión superior de 2000 psi, cualquier sustancia cuya concentración sea superior a unos cuantos microgramos por litro (partes por mil millones), se considera un contaminante indeseable. Aun en calderas que trabajan a presiones comprendidas entre 600 y 1500 psi, como las de muchas termoeléctricas modernas, la concentración de sales disueltas y los sólidos suspendidos en el agua de reemplazo se limitan unos cuantos miligramos por litro. A presiones inferiores, es posible trabajar con cantidades apreciables de sólidos disueltos en el agua. En la tabla 2 se encuentran los valores generales indicados por la *American Boiler and Affiliated Industries*

*Manufacturers Association* para calderas dotadas de domos de vapor.

**Tabla 2.** Límites de concentración de materiales en el agua para calderas.

<b><i>Presión a la salida de la caldera, psi</i></b>	<b><i>Sólidos totales ppm</i></b>	<b><i>Alcalinidad (CaCO<sub>3</sub>) ppm</i></b>	<b><i>Sólidos suspendidos ppm</i></b>	<b><i>Sílice ppm</i></b>
0 a 300	3500	700	350	125
301 a 450	3000	600	250	90
451 a 600	2500	500	150	50
601 a 750	2000	400	100	35
751 a 900	1500	300	60	20
901 a 1000	1250	250	40	8
1001 a 1500	1000	200	20	2,5
1501 a 2000	750	150	10	1,0
Hasta 2001	500	100	5	0,5

## **2.2 ENFRIAMIENTO EN PROCESOS INDUSTRIALES**

En sistemas de enfriamiento de un solo paso, en los que el calor se elimina de un proceso, únicamente provoca el aumento de la temperatura del agua, que después se desecha o se utiliza en alguna otra aplicación, se han empleado casi todas las calidades de agua, inclusive la de mar. En sistemas de esta naturaleza, no se considera factible eliminar los sólidos suspendidos en los grandes flujos de agua de enfriamiento. Cuando la acumulación de sedimentos sobre las superficies de transferencia de calor es tal que pone en peligro su buen funcionamiento, tiene que eliminarse por medios mecánicos o químicos. Actualmente, es necesario reducir la temperatura del agua de descarga proveniente de sistemas de enfriamiento de un paso antes de incorporarla a su fuente original.

Una de las desventajas generales de los sistemas de enfriamiento de un paso es la acumulación de organismos productores de limo, a menos que se mantengan bajo control mediante la adición periódica de cloro al agua.

Como resultado del depósito de hidróxidos de hierro, manganeso, o ambos, presentes en el agua de enfriamiento, se forman también recubrimientos inorgánicos, a menudo de una naturaleza limosa. Las incrustaciones de carbonato de calcio, ocurren cuando el agua de enfriamiento se encuentra prácticamente saturada al llegar a la superficie de transferencia de calor y se caracterizan por ser muy fuertes.

Cuando el calor de agua de enfriamiento se elimina por evaporación, como sucede en una torre de enfriamiento, los sólidos disueltos se concentran en el agua recirculada al sistema de enfriamiento. Como resultado de esto, aumentan las probabilidades de que se formen incrustaciones por depósito de carbonato de calcio. Cuando el agua tiene un alto contenido de iones de calcio y sulfato, se deposita el sulfato de calcio.

Puesto que la torre de enfriamiento funciona como un lavador gigantesco de aire, el agua que se recircula al sistema de enfriamiento constantemente arrastra bacterias y otros diminutos organismos vivos transportados por el aire. También acumula polvo, se satura de oxígeno y recoge gases tales como bióxido de carbono, bióxido y trióxido de azufre, cloruro de hidrógeno, sulfuro de hidrógeno o amoníaco que se desprenden al quemar combustible o que provienen de algún proceso químico. Por lo general, la obstrucción de superficies de transferencia térmica, la corrosión de las líneas y de los equipos metálicos, se controla por medio de diversas técnicas de acondicionamiento que son económicamente justificables en los sistemas de recirculación.

**Tabla 3.** Concentración permitida para recirculación de aguas de torres de enfriamiento.

<b>Contaminante</b>	<b>Máxima concentración recomendada</b>
Calcio	800 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Magnesio	250 ppm como CaCO <sub>3</sub>
Sílice	174 ppm como SiO <sub>2</sub>
Hidrocarburos totales	10 ppm
Sólidos disueltos	Según el material de los tubos
Sólidos suspendidos	200 ppm
Amoniaco	10 ppm

**Tabla 4.** Composición característica de una purga de torre de enfriamiento y una purga de caldera

<b>Contaminante</b>	<b>Torre de enfriamiento</b>	<b>Caldera</b>
pH	7,3	11,6
Sólidos suspendidos (ppm)	34	40
COD (ppm)	141	201
Hidrocarburos (ppm)	7	14
Cromo (ppm)	12,2	0,8
Fenoles (ppm)	-	0,1
Fluoruros (ppm)	-	6,8
Amoniaco	-	3,3
Fosfatos	4,9	-
Sólidos disueltos (ppm)	7,65	-

### **3. TRATAMIENTOS PARA EL AGUA DE PROCESO**

La purificación del agua para uso industrial puede ser muy compleja o relativamente simple, dependiendo de las propiedades del agua cruda y el grado de pureza requerida. Se emplean muchos métodos y combinaciones de ellos, pero todos abarcan tres procesos básicos: tratamiento físico, químico y fisicoquímico.

Existe un cuarto proceso básico, el tratamiento biológico, que se emplea a menudo para purificar agua de desecho antes de descargarla. Este proceso aprovecha la acción de algunos microorganismos para inducir diversas reacciones químicas y fisicoquímicas.

#### **3.1 TRATAMIENTO FÍSICO**

El tratamiento físico abarca los procesos mediante los cuales las impurezas se separan del agua sin producir cambios en la composición de las sustancias. Los métodos más comunes son sedimentación, colado y filtrado, separación de fases líquidas múltiples, desgasificación, dilución, eliminación de arrastres, destilación y extracción.

##### **3.1.1 Sedimentación**

En la sedimentación se aprovecha la acción que ejerce la fuerza de gravedad sobre las partículas más pesadas que el agua, que descienden depositándose en el fondo. Las aguas superficiales contienen diferentes cantidades de materia en suspensión y este método se utiliza para clarificar el agua cruda, ya sea por sedimentación simple o mediante la adición de

coagulantes químicos. Los recipientes en donde se lleva a cabo este proceso se denominan tanques de sedimentación.

El tamaño, peso y forma de la partícula, así como su resistencia a la fricción y viscosidad desempeñan un importante papel en el diseño de dichos tanques. Los cálculos teóricos se basan casi siempre en modificaciones de la ley de Stokes y se supone que todas las partículas son esféricas. Aunque son muchos los factores que intervienen en el diseño, todos ellos deben modificarse según lo indique el sentido común y la experiencia.

Los depósitos de sedimentación pueden construirse de tierra, madera, concreto o acero; su forma puede ser rectangular o circular y el periodo de retención varía generalmente entre 4 y 12 horas. Cuando el agua contiene grandes cantidades de sólidos, los depósitos cuentan casi siempre con rastras mecánicas que mueven los lodos sedimentados hacia un foso colector, el cual los hace salir del depósito. En otros casos se cuenta con válvulas manuales para la descarga de lodos, que permiten eliminar parte del material sedimentado, siendo necesario desmontarlas periódicamente para efectuar una limpieza minuciosa.

Dependiendo de la naturaleza de los sedimentos y de la materia suspendida, la sedimentación simple puede eliminar hasta el 70% del material. Cuando se utilizan coagulantes, esta cifra puede llegar hasta el 95%.

La flotación por medio de aire es muy eficaz para separar sólidos floculentos que sedimentan con mucha lentitud o tengan tendencia a flotar. El aire se dispersa a presión dentro del líquido que se encuentra en un recipiente cerrado e inmediatamente antes de descargar la mezcla al depósito receptor se alivia la presión. Al subir el aire finamente disperso hace flotar los sólidos hasta la superficie, donde forman una espuma que puede separarse. Este

método permite una eliminación efectiva a un costo mínimo.

### **3.1.2 Colado y filtrado**

Los coladores y filtros pueden utilizarse cuando sea necesario eliminar sólidos suspendidos o flotantes en el agua, ya sea como paso adicional, después de la sedimentación, o cuando el espacio disponible no permite la instalación de depósitos de sedimentación.

### **3.1.3 Desgasificación**

Las operaciones de extracción físicas, como la desaireación y la aireación, son procesos que sirven para eliminar los gases indeseables disueltos en el agua. Exponiendo grandes superficies de líquido a una fase de vapor deficiente en los compuestos que se desea suprimir pueden eliminarse uno a más gases disueltos, por ejemplo, oxígeno, bióxido de carbono, amoníaco o sulfuro de hidrógeno.

El equipo para desgasificación puede clasificarse como unidades de ebullición, de platos a goteo y de aspersion. En el tipo de ebullición se hace burbujear un gas apropiado a través del líquido, durante el tiempo suficiente para cambiar el equilibrio de la presión del vapor y aumentar la superficie del líquido. En el pasado, este método se utilizó con frecuencia para la eliminación de sulfuro de hidrógeno y bióxido de carbono; actualmente, su principal aplicación es para separar el bióxido de carbono y el oxígeno del agua en los precalentadores que alimentan las calderas, los que casi siempre trabajan a baja presión.

En el equipo de platos o de goteo, grandes superficies de líquido se exponen a la presión de vapor deseada, haciendo fluir lentamente el agua sobre placas, canales, tiras angostas o material de empaque, de donde escurre, cayendo en forma de pequeñas gotas o de capas delgadas. Este método

también se utiliza para la eliminación de oxígeno y bióxido de carbono en los precalentadores de las calderas, a una presión de unas cuantas libras y a temperaturas superiores a 100°C. Bajo este mismo principio operan los desgasificadores que se utilizan para eliminar bióxido de carbono en procesos donde la alcalinidad se controla por adición de ácido, mezclando los efluentes de unidades de zeolita que operan en ciclo de hidrógeno y en ciclo de sodio o bien, después de un intercambio de cationes.

En los desaireadores que funcionan por aspersión y ebullición se utiliza la acción combinada de boquillas atomizadas de ebullición y arrastre, para dividir el agua en finas gotas, que se exponen a las condiciones deseadas de presión de vapor. Este equipo cada vez tiene mayores aplicaciones, no solo en calentadores para calderas, sino también en la desaireación al vacío para eliminar bióxido de carbono y oxígeno del agua fría y amoníaco del agua caliente. La desaireación al vacío se efectúa en una o dos etapas, casi siempre en tanques de acero verticales, en donde el vacío se mantiene por medio de eyectores de vapor.

Excepto en la desaireación al vacío, siempre deben utilizarse algunos medios para mantener la presión parcial de los gases indeseables muy por debajo del punto en el que cesará la extracción. En un depósito o torre para desgasificación, el aire que se bombea o se inyecta a través del equipo arrastra el gas indeseable hacia la atmósfera. En los precalentadores de calderas el agente extractor es vapor, con una presión parcial baja de oxígeno libre. Por lo general se instala un condensador con respiradero para permitir que el agua entre y absorba la mayor parte del calor del vapor de extracción.

#### **3.1.4 Destilación**

La destilación es el método mas antiguo para obtener agua pura de alta

calidad. Mediante este proceso puramente físico de evaporación y condensación pueden eliminarse casi totalmente tanto los sólidos disueltos como los suspendidos. El condensado de una unidad de destilación de agua, que cuenta con un buen equipo separador de vapor y que trabaja a velocidades normales de evaporación no debe contener más de unos cuantos miligramos por litro de sólidos disueltos, y es posible que su concentración sea sólo una fracción de 1 ppm. Los sólidos suspendidos y disueltos del agua de alimentación se quedan en las salinas del evaporador y se eliminan mediante operaciones de purga y desincrustación.

La alta calidad del producto que se obtiene, confirió al proceso de destilación una ventaja inicial sobre los métodos de tratamiento del agua para alimentación de calderas. Empleando la destilación, gran parte del problema del acondicionamiento del agua se maneja en evaporadores de baja presión, que pueden operarse en forma más eficiente. Los evaporadores, tanto de un solo efecto como de varios, han encontrado una aplicación muy generalizada en plantas en donde, se desperdiciaban grandes cantidades de calor de bajo nivel o vapor de escape. El calor de bajo nivel, llamado a veces de desecho, tiene su propio valor y sin embargo, con frecuencia es subestimado su costo. Cuando no se dispone de calor de bajo nivel en cantidades suficientes o cuando se esta aprovechando en aplicaciones más valiosas el equipo de destilación por compresión, es mas económico.

En las industrias en que la concentración permisible de sólidos disueltos en el agua de proceso es de unos cuantos miligramos por litro, se puede utilizar la destilación o cualquier proceso de desionización. La elección dependerá en gran parte de la concentración de sólidos disueltos en el agua cruda.

El equipo de destilación debe estar diseñado de tal forma que la eliminación de lodos o incrustaciones pueda hacerse con un mínimo de mano de obra. El

problema es similar al de una caldera, excepto que la temperatura es casi siempre mas baja. Las velocidades de transferencia de calor a temperaturas bajas son más vulnerables a los efectos aislantes de las incrustaciones y de los depósitos del lodo.

Mediante la destilación fraccionada o múltiple se puede obtener agua destilada de una calidad extremadamente alta. En este proceso, parte del producto se condensa y escurre, lavando las sales y los sólidos que arrastra el vapor producido en el generador de vapor.

## **3.2 TRATAMIENTO QUÍMICO**

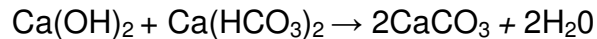
El tratamiento químico es uno de los procesos en los que la separación de las impurezas del agua implica la alteración de la composición del material contaminante. Puede incluir operaciones de precipitación, intercambio de iones, reacción, reacciones de oxidación y de reducción, neutralización, desgasificación, control químico de desarrollos biológicos y esterilización, entre otros.

### **3.2.1 Precipitación**

Cuando se añaden a una solución acuosa algunas sales solubles, parte de los iones libres pueden reaccionan para formar compuestos comparativamente insolubles. El precipitado puede separarse por filtración o decantación del líquido claro después de que se ha asentado el precipitado. La precipitación se produce de acuerdo con leyes definidas que rigen los pesos de combinación de los reactivos y sus productos de solubilidad. Muchos de los métodos que se describen a continuación dependen de la precipitación de las impurezas.

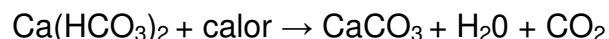
### 3.2.2 Suavizamiento

El primer proceso de precipitación que se empleó comercialmente, fue la adición de cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), al agua para eliminar la dureza de bicarbonatos. La cal disminuye la dureza de bicarbonatos formando carbonato de calcio relativamente insoluble:

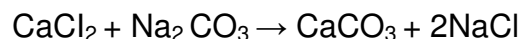


El proceso se puede efectuar tanto en equipo intermitente como continuo. En cualquier caso, es necesario ejercer un control minucioso de la dosificación de cal para llegar a la dureza mínima teórica. Por lo general, si las partículas de cal son lo suficientemente pequeñas y se proporciona una buena agitación, el costo del reactivo necesario para el tratamiento es bajo. Dispersando cal viva, o bien dispersando eficientemente cal hidratada, pueden obtenerse partículas del tamaño apropiado.

La eliminación de dureza de carbonatos calentando el agua para expulsar el bióxido de carbono disuelto y el que proviene de compuestos inestables, logra el mismo resultado que la adición de cal:



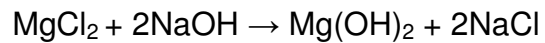
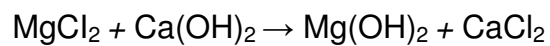
El agua cuya dureza no se debe a la presencia de carbonatos, solo se suaviza en forma parcial al agregar cal. La dureza de no carbonatos se elimina mediante la adición de carbonato de sodio:



Usualmente, el carbonato de sodio se combina con la cal para eliminar ambos tipos de dureza en un solo paso. Las dos reacciones se pueden

efectuar en forma simultánea, en caliente o en frío, en equipos intermitentes o en forma continua. Por lo general se utiliza un coagulante para mejorar la separación de la fase sólida.

El magnesio puede precipitarse en un suavizador de cal-carbonato incrementando la concentración de hidróxidos en el efluente hasta un punto en el que el hidróxido de magnesio sea relativamente insoluble. Esto puede lograrse con cal hidratada o con sosa cáustica:

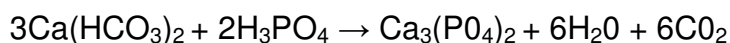


Si el magnesio se precipita por medio de cal, no se produce una reducción apreciable en la dureza a menos que se utilice una cantidad adicional de sosa para precipitar al calcio que sustituye al magnesio. En algunos casos es económico precipitar el magnesio adicionando únicamente sosa cáustica, en vez de cal y carbonato de sodio. Esto elimina los problemas de alimentar lechada de cal y las dificultades que causa el tamaño de las partículas.

La mayoría de las instalaciones de proceso continuo para el ablandamiento por cal y carbonato o sosa cáustica, utilizan los lodos acumulados en suspensión para favorecer al crecimiento de las partículas de precipitado. Este método hace que los procesos de reacción química y absorción se realicen en un lapso corto. La unidad en que se realiza esta operación se conoce como precipitador de lecho de lodo suspendido.

La temperatura desempeña un papel muy importante en la reacción química. Cuando se desea una dureza baja se puede utilizar agua caliente, como en la alimentación de calderas, se emplean temperaturas comprendidas entre 104°C y 146°C. A temperaturas comprendidas entre 10°C y 26°C, la dureza mas baja que puede obtenerse es de 70 ppm aproximadamente, pero a

104 °C puede reducirse hasta 25 ppm, y a 146 °C, alcanza un valor de 10 ppm. Es conveniente que el suministro de reemplazo de una caldera tenga una dureza de cero siendo evidente que el método de cal y carbonato no puede proporcionar este nivel. Con mucha frecuencia después del tratamiento con cal y carbonato en caliente se emplea la suavización con fosfatos como una segunda etapa del proceso. Cuando la dureza inicial es de 30 ppm o menor, se utiliza un suavizamiento en una sola etapa. El método se basa en la precipitación del ión de calcio como fosfato tricálcico, que es un material insoluble:



Se puede utilizar cualquiera de los fosfatos, añadiéndolos en solución acuosa. Cuando la dureza de calcio es principalmente por bicarbonatos, el ácido fosfórico permite obtener el control de la alcalinidad al mismo tiempo que el total de sólidos en el efluente es menor. La reacción se efectúa a un pH de 10 o más alto, manteniéndose unos cuantos mg/L de hidróxido residual. La dureza en el agua tratada es aproximadamente 1ppm en forma de  $\text{CaCO}_3$ . Cuando se emplean fosfatos para precipitar el calcio, se utiliza sosa cáustica para la precipitación del ión de magnesio.

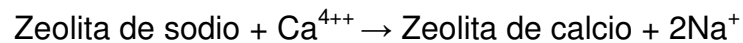
### **3.2.3 Intercambio iónico**

Para que el suministro de agua sea satisfactorio y pueda utilizarse en procesos o en alimentación de calderas, algunas veces es necesario eliminar cationes o aniones o bien, ambos. Ciertas sustancias insolubles poseen la capacidad de intercambiar los iones enlazados en su estructura molecular con otros iones dentro del agua. Los iones intercambiados se liberan por un proceso de regeneración de la resina de intercambio. Dependiendo de la naturaleza de esta resina pueden intercambiarse iones de carga positiva o negativa. Existe una gran variedad de materiales sólidos que poseen esta

propiedad reversible. Una diferencia que distingue a los procesos de intercambio de iones de la precipitación, es que en los primeros solo se producen como desecho soluciones, en tanto que en el segundo se producen tanto líquidos como sólidos. Esta importante diferencia puede ser un factor decisivo en la elección del proceso adecuado.

Durante muchos años se han utilizado sustancias naturales y sintéticas (zeolitas) para eliminar los iones de calcio y magnesio del agua. Posteriormente, al regenerarse la zeolita estos iones se sustituyen por otros de sodio:

*Suavizamiento:*

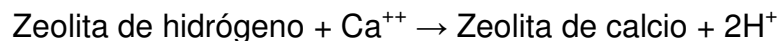


*Regeneración:*



El proceso será igualmente eficiente si los iones de calcio y magnesio se sustituyen con iones de potasio o con cualquier otro ión positivo que pueda existir en una solución neutra relativamente concentrada.

En la operación del ciclo de hidrógeno, el material intercambia sus iones de hidrógeno por calcio, magnesio, sodio y otros iones positivos; posteriormente se regenera tratándolo con ácido sulfúrico o clorhídrico:



El efluente de los intercambiadores de iones de hidrógeno contiene una acidez mineral libre y resulta conveniente operar en paralelo con intercam-

biadores en ciclo de sodio o mezclar el efluente con agua no tratada para neutralizar la acidez. La combinación de intercambio iónico en ciclo de sodio y en ciclo de hidrógeno hace posible eliminar la dureza y reducir la alcalinidad al mismo tiempo, la dureza del bicarbonato se convierte en bióxido de carbono disuelto que se puede separar por desgasificación.

El intercambio de iones debe competir con la destilación para producir agua de alta pureza para uso industrial. La elección entre los dos procesos depende en gran parte de la concentración total de sustancias ionizadas y no ionizadas que contenga el abastecimiento de agua, y de si se requiere agua estéril del proceso.

#### **3.2.4 Reacciones de oxidación**

Las aguas superficiales y subterráneas pueden contener sustancias que producen olores y sabores que impiden su uso como agua potable y en algunos procesos. Estas sustancias son casi siempre orgánicas y a menudo se pueden eliminar por oxidación.

Los estanques de aspersión sirven para este propósito. Por medio de boquillas el agua se rocía en el aire en forma de finas gotitas que caen sobre el estanque. El contacto íntimo que se establece entre el agua y el aire permite la oxidación deseada y por lo general, se liberan al mismo tiempo los gases disueltos. En lugar del estanque de aspersión se puede utilizar una torre de desgasificación con circulación forzada que funciona con una eficiencia similar.

## 4. AGUAS RESIDUALES CARACTERÍSTICAS DE UNA REFINERÍA

### 4.1 AGUA DESALINIZADORA

La desalinización debe proveer a una refinería un crudo que contenga de 0,1 a 0,2% de agua y menos de 1 a 10 ppm de sal.

El agua usada para la desalinización de crudo es baja en minerales, neutra y suave.

- pH 6 a 7,3
- $\text{Cl}^- < 50$  ppm
- $\text{S}^- < 20$  a 50 ppm
- Desoxigenada

El volumen de agua de lavado agregada depende de la viscosidad del crudo y de la temperatura de desalado. Los siguientes enunciados dan una idea de las cantidades requeridas.

- 3 a 5% del alimento para API<sup>º</sup> 40
- 5 a 8% del alimento para API<sup>º</sup> de 30 a 40
- 8 a 10% del alimento para API<sup>º</sup> 30

El agua de desalado de crudo puede ser suministrada por:

- Agua Industrial
- Recirculación parcial de los condensados de destilación, o condensados de vapor de cracking que contienen menos sales.

#### 4.1.1 Composición de los efluentes de desalado

A la salida del desalador, el agua puede tener las siguientes características:

- Temperatura de 40 a 60°C
- Alta salinidad clorhídrica: 2000 a 15000 ppm.
- Bajo contenido de  $S^{-2}$  (10 ppm) y fenol (5 a 20 ppm)
- pH 7 a 8
- DQO (demanda química de oxígeno): 100 a 300 ppm
- Hidrocarburos emulsificados: 100 a 200 ppm
- Otros sedimentos que contienen vanadio y sales de aluminio.

#### 4.2 CONDENSADOS

Estos efluentes vienen de la condensación del vapor que ha estado en contacto con petróleo o sus compuestos, se puede dividir en tres categorías:

- Condensados de destilación
- Condensados agrios
- Condensados de calentamiento de productos

##### 4.2.1 Condensados de destilación

- **Topping.** Estos condensados vienen con los productos de destilación del vapor que es inyectado para calentar el crudo, y son recolectados en el tope de la columna. Representan de 2,5 a 3,5% del alimento.
- **Destilación al vacío.** Estos condensados vienen, de la misma manera, con los productos de la destilación al vacío; también vienen de los eyectores de vacío y los condensadores barométricos. Representan de 3 a 4% del alimento. La contaminación es baja en estos condensados y pueden ser reutilizados en procesos como el desalado del crudo.

#### **4.2.2 Condensados agrios**

Estos condensados vienen de las operaciones de FCC (fluid catalitic cracking) e hidrocracking, en donde el vapor es usado para inyección y aireación. Representan de 6 a 12% del alimento.

Los productos procesados de alta viscosidad son ricos en sulfuros el cual es hidrogenado y arrastrado por el vapor. Agua desmineralizada puede ser agregada aguas arriba para disminuir las presiones parciales del  $H_2S$  y  $NH_3$  en la corriente y arrastrar estos gases disolviéndolos.

El  $NH_3$  viene de la hidrogenación de componentes de nitrógeno y fenoles por la reacción entre el vapor e hidrocarburos cíclicos.

No pueden ser reciclados a los desaladores o descargados al sistema de alcantarillas sin una previa desulfurización por despojamiento o 'stripping'. Dada la naturaleza de los productos craqueados, estos condensados pueden formar una emulsión química estable.

**Tabla 5.** Producción y composición de condensados en procesos de refinación.

	Topping	Destilación al vacío	Cracking catalítico	Hidro- desulfurización	Condensado de crackeo
% alimento	2,5 – 3,5	3 - 4	6 - 12	3 - 6	15 - 35
pH	6 - 7	6 - 7	8 – 9,5	5 - 6	6 – 8,5
HS <sup>-</sup> (ppm)	20 - 200	10 - 50	500 - 3000	3000 - 5000	10 - 20
Cl <sup>-</sup> (ppm)	5 - 100	5 - 50	10 - 50	10 - 30	10 - 30
CN <sup>-</sup> (ppm)	-	-	5 - 200	5 - 10	-
NH <sub>4</sub> (ppm)	10 - 60	5 - 30	300 - 3000	1500 - 3000	trazas
Fenoles (ppm)	10 - 30	5 - 10	80 - 300	10 - 20	20 - 30
Hidrocarburo (ppm)	30 - 60	5 - 20	5 - 60	5 - 20	30 - 50

#### **4.2.3 Condensados de calentamiento de productos**

Contienen una baja contaminación, solamente una pequeña carga de hidrocarburos parafínicos que pueden ser eliminados para su reutilización. Este tipo de reciclo tiene grandes ventajas económicas.

### **4.3 AGUAS ACEITOSAS**

Agua aceitosa es el principal efluente en una refinería. Se puede dividir en dos grupos cada uno de los cuales puede disponer de su propia red y de su propio tratamiento específico.

#### **4.3.1 Aguas aceitosas corrientes**

- Drenaje de almacenamiento de crudo y productos de refinación.
- Agua de lluvia que ha caído en las unidades, estaciones de bombeo y otros.
- Agua empleada para lavar
- Agua de enfriamiento de bombas

#### **4.3.2 Aguas aceitosas accidentales**

Proviene en las purgas de los sistemas de enfriamiento cuando los intercambiadores de calor poseen fugas.

### **4.4 SODA GASTADA**

Este efluente representa volúmenes muy pequeños pero muy ricos en sales de sodio, en fenoles y  $S^{2-}$ . Su tratamiento incluye dilución y tratamientos independientes.

## 5. AGUAS RESIDUALES EN LA GCB\*

La GCB\* genera varios tipos de agua residual en los cuales se encuentran los procesos ya mencionados en el capítulo 4 y otros procesos que se tratarán a continuación.

### 5.1 AGUAS ÁCIDAS

Proviene de la planta de ácido sulfúrico, la cual produce ácido del 98% a partir de la combustión de ácido gastado, ácido sulfhídrico y gas natural. Esta planta está concebida como un elemento complementario al proceso de alquilación, pues evita que el ácido sulfúrico gastado contamine los efluentes circundantes.

El agua que se usa en la operación de la planta de ácido sulfúrico, es en su mayoría agua clarificada, exceptuando el agua necesaria para la generación de vapor.

**Tabla 6.** Características del agua utilizada en la planta de ácido.

<b>Contaminante</b>	<b>Concentración ppm</b>	<b>Contaminante</b>	<b>Concentración ppm</b>
S. suspendidos	50	Sulfuros	2
S. disueltos	460	Hidrocarburos	0
Oxígeno disuelto	83	Dureza	323
Cloruros	83	Sílice	5,5

---

\* Gerencia del complejo industrial Barrancabermeja

Los efluentes de la planta de ácido sulfúrico son aguas ácidas; debido a que el agua se utiliza en procesos de purificación y lavado de gases, en el enfriamiento del ácido y en la absorción del trióxido de azufre.

- **Agua de Enfriamiento.** Se utiliza en los enfriadores de ácido sulfúrico que se encuentran ubicados a la salida de las torres de absorbedoras y en el intercambiador de grafito a la salida del separador de efluentes, el consumo de agua es del orden de los 500 Kg por tonelada de ácido que se produzca.
- **Agua de Lavado.** Se utiliza durante el proceso de purificación de los gases en especial para el retiro de trióxido de azufre, el consumo de esta agua depende de la eficiencia de combustión en el horno que quema ácido gastado. Esta agua produce un ácido débil que es recirculado al proceso de purificación.
- **Agua de Absorción.** Se utiliza en las torres absorbedoras para reducir el ácido sulfúrico a partir del trióxido de azufre presente, el consumo es de 183,8 Kg de agua por tonelada de ácido que se produzca, también el agua es utilizada para ajustar la concentración del ácido cuando esta se excede.

Actualmente las aguas ácidas que se generan en la planta de ácido sulfúrico provienen del lavado de los gases durante su purificación. Esta agua posee una concentración menor al 5% de ácido sulfúrico y son enviadas a una fosa donde posteriormente son bombeadas al sistema de aguas aceitosas del complejo.

## 5.2 AGUAS AGRIAS

Proviene de lavados de gases en los cuales se retiran los iones sulfuros, polisulfuros y amoníaco; mediante operaciones de contacto gas-líquido. En la

GCB, las aguas agrias provienen de cracking, petroquímica y generación de hidrógeno.

Petroquímica se conoce como aquellos procesos en los que los aceites desparafinados y las ceras, obtenidas en la unidad de desparafinado con Mec-Tol, son mejorados en su calidad mediante el proceso de Hidrogenación catalítica no severa (Hydrofinishing). El propósito de este proceso es reducir el contenido de azufre, nitrógeno y oxígeno y el de saturar olefinas y aromáticos para mejorar la calidad de los productos.

Petroquímica consta de los procesos: tratamientos con hidrógeno, tratamientos nafténicos con hidrógeno y tratamientos parafínicos con hidrógeno; en los cuales la única diferencia es la clase de hidrocarburo con la que trabajan.

El proceso de generación de hidrógeno se basa en el reformado catalítico del gas natural con vapor de 400 psig.

La mayoría de las aguas agrias, en la GCB, se llevan a la planta despojadora de aguas agrias para su regeneración, sin embargo, las aguas agrias despojadas se envían a la PTAR (planta de tratamiento de aguas residuales).

## 6. PROCESOS TÍPICOS DE REGENERACIÓN DE AGUAS EN UNA REFINERÍA

### 6.1 TRATAMIENTO DE AGUAS AGRIAS

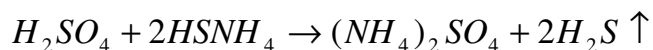
Este proceso toma lugar antes de reciclar el agua o descargarla a los desagües, a través de purificación físico-química. Se puede llevar a cabo por medio de dos procesos: Un despojamiento (stripping) o una oxidación.

Los efluentes de los procesos de Hidrocracking y FCC (fluid catalitic cracking) deben ser tratados por despojamiento. Por otra parte, una mezcla de condensados de topping con una concentración de  $S^{-2}$  inferior a 300 ppm debe ser oxidada.

#### 6.1.1 Despojamiento

Los condensados de FCC (fluid catalitic cracking) son ricos en  $NH_4^+$ , por lo tanto no pueden ser directamente reciclados debido a que ocasionan un aumento en el pH del agua. También debe evitarse reciclar el  $S^{-2}$ .

- **Preacidificación.** El propósito de la preacidificación es disociar las sales de amonio, se lleva a cabo con un ácido fuerte.



- **Despojamiento.** Los productos de esta reacción se retiran mediante un lavado con vapor en una torre empacada. Esta torre debe poseer una alta resistencia a la corrosión por lo cual normalmente se rellena con empaques antioxidables. Por la cima de esta columna tenemos unos vapores sulfurosos de los cuales se puede recuperar azufre para

otros propósitos. Por el fondo tenemos unos condensados con un contenido de unos pocos miligramos por litro de  $S^{-2}$ .

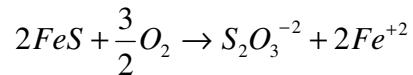
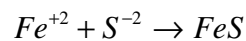
### 6.1.2 Oxidación

Esta operación envuelve la oxidación de sulfitos inicialmente presentes en la forma de  $NH_4SH$  junto con el coexistente  $(NH_4)_2S$  y  $NH_4OH$ . La oxidación catalítica por aire asegura la oxidación a tiosulfato  $S_2O_3^{-2}$ . La cinética del proceso puede ser acelerada por la adición de catalizador (metal bivalente  $Mn^{+2}$ ,  $Fe^{+2}$ ,  $Co^{+2}$  o  $Fe^{+3}$ )

Este proceso de oxidación se lleva a cabo a presión atmosférica.

Cuando no se utiliza catalizador, la reacción es muy lenta y puede incurrir en la formación más rápida de poli-sulfitos.

Los catalizadores son agregados en la forma de hierro ferroso o férrico:



## 6.2 TRATAMIENTO DE AGUAS ACEITOSAS

El principal propósito es eliminar los hidrocarburos flotantes y los hidrocarburos en emulsión. El agua resultante debe estar lo suficientemente libre de aceites para su posterior disposición. En este proceso no se utilizan reactivos.

La separación de hidrocarburos se puede llevar a cabo por dos procesos:

- **Gravedad natural.** Separadores que retiran los hidrocarburos dada una velocidad de sedimentación, según su gravedad específica.
- **Gravedad artificial.** Centrífugas y ciclones que causan un incremento del campo gravitacional y pueden ser usados para la separación.

Hay dos clases de separadores por gravedad empleados en las refinerías:

- **Separadores settler.** El aceite es recogido directamente de la superficie del agua. Estos incluyen separadores longitudinales API y separadores circulares.
- **Separadores lamella.** O separadores de platos, donde el aceite es recolectado directamente de la superficie inferior de un plato oblicuo y luego llevado a la superficie.

## **7. TÉCNICAS DE REUTILIZACIÓN Y MINIMIZACIÓN DE AGUA RESIDUAL**

### **7.1 “WATER PINCH”**

A mediados de 1990, la tecnología “Water Pinch” emergió como una significativa aproximación a los problemas de re-uso de agua industrial, reducción de aguas residuales y diseño de sistemas de tratamiento de efluentes. Esta tecnología permite a los nuevos ingenieros analizar el uso de agua en un proceso antes de diseñar la operación. También permite hacer un análisis posterior, para minimizar el consumo de agua fresca y la generación de agua residual.

En 1994 Y.P. Wang y Robin Smith de la universidad de Manchester, Instituto de ciencia y tecnología, Reino Unido; publicaron los dos primeros artículos sobre tecnología “water pinch” en la revista Chemical Engineering Science. En estos trabajos se aplica la tecnología de integración de procesos a la reducción de agua residual y al diseño de sistemas de tratamiento de efluentes.

El “water pinch” es una técnica sistemática para el análisis de redes de aguas industriales y la reducción de los costos de aguas de proceso. Para su desarrollo utiliza avanzados algoritmos para identificar las mejores opciones de reuso, redistribución y tratamiento de efluentes.

#### **7.1.1 La tecnología “Water Pinch”**

Conceptualmente, la tecnología “Water Pinch” es un tipo de integración de intercambio de masa que involucra operaciones que emplean agua en sus procesos. Está dividida en tres estrategias:

- **Análisis:** Identificar el consumo y generación mínima, de agua fresca y residual, respectivamente. (Determinación de los puntos Pinch)
- **Síntesis:** Diseñar una red de agua industrial para los flujos mínimos de agua fresca y residual, a través de la reutilización, regeneración y reciclaje de las aguas de proceso.
- **Cambios en el proceso:** Modificar la red de agua existente para maximizar la reutilización y minimizar la generación de agua residual a través de efectivos cambios en el proceso.

Para el diseño de redes industriales de agua, la tecnología “water pinch” se desarrolla a través de seis pasos así:

- **Determinar las corrientes:** Se desarrolla un modelo de la red de agua del proceso, donde se muestra donde se emplea (incluyendo los servicios industriales) y donde se generan las aguas residuales. Se realiza un balance de agua para determinar los datos apropiados para el análisis y determinación de las fuentes y los pozos.
- **Encontrar las composiciones de los contaminantes:** Seleccionar los contaminantes clave como las sales y los sólidos suspendidos. Un contaminante clave es aquel que previene la directa reutilización de la corriente residual; esto puede incluir temperatura y acidez. Escoger las concentraciones de diseño; es decir, la máxima aceptable por los pozos y la mínima disponible en las fuentes. Esta parte puede requerir la ayuda de expertos en estas tecnologías de proceso.
- **Modelar la información (correr software):** Lleva a cabo el análisis multidimensional “water pinch” para determinar las correlaciones

óptimas entre fuentes y pozos. La primera ronda de resultados probablemente no sea el diseño más práctico, pero representa una solución al problema.

- **Identificar los puntos pinch:** Examinar los diagramas de sensibilidad e identificar los cuellos de botella. Considerar las modificaciones al proceso y las opciones de regeneración.
- **Revisar el diseño:** Examine la red diseñada, usualmente en este punto es necesario evaluar y determinar qué contaminantes adicionales deben ser considerados y qué correlaciones deben ser despreciadas. Por último se repiten los pasos 3-5 hasta que un diseño práctico sea desarrollado.

## 7.2 PRINCIPIOS GENERALES PARA LA REDUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL

Hay cuatro principios generales para reducir la producción de agua residual en un proceso industrial. (Wang y Smith, 1994):

- **Cambios en el proceso:** Cambios en el proceso pueden reducir la inherente demanda de agua, estos cambios infieren diferentes transformaciones físico-químicas.
- **Re-uso del agua:** El agua residual puede ser directamente re-usada en otras operaciones cuando el nivel de contaminación previa no interfiere con la operación posterior. Esta re-utilización reduce el consumo de agua fresca y las aguas residuales, pero mantiene una alta carga de contaminante.
- **Regeneración:** El agua residual puede ser regenerada parcial o totalmente para remover los contaminantes que, de otra manera, podrían evitar su re-utilización. La regeneración es una operación que

remueve los contaminantes que no permiten su re-utilización y puede constar de tratamientos como filtración, ablandamiento, suavización. La regeneración reduce el consumo de agua fresca, el volumen de agua residual y disminuye la carga total de contaminante.

- **Reciclo:** El agua residual puede ser regenerada para remover contaminantes y después reciclada. Puede ser recirculada a cualquier parte del proceso que sea conveniente, inclusive, puede ser recirculada sin ser regenerada.

## **8. PRINCIPIOS DE LA OPTIMIZACIÓN DEL USO DE AGUA INDUSTRIAL**

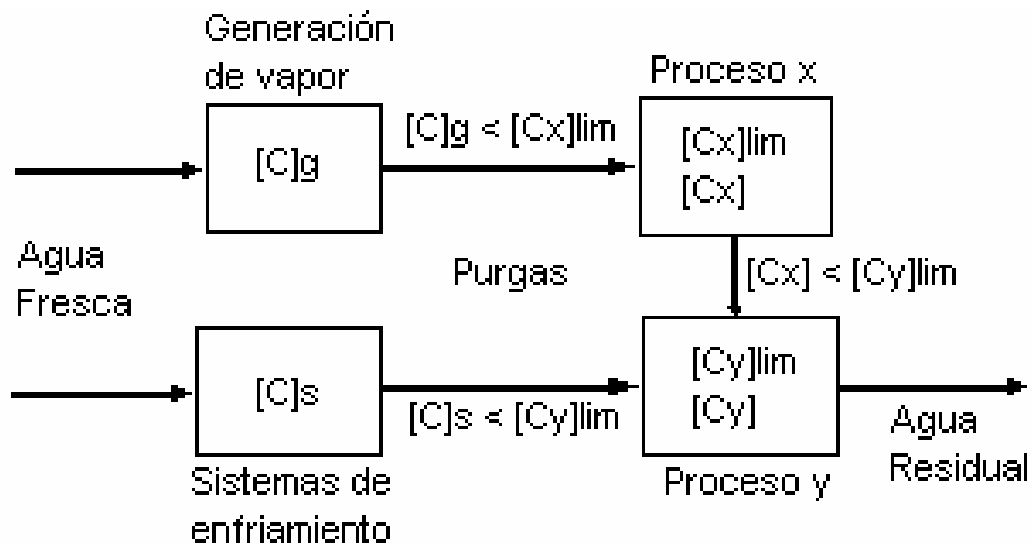
Los principios básicos para la reutilización de agua industrial y reducción de aguas residuales, fueron desarrollados por Wang y Smith a lo largo de la década de los 90's. También han sido desarrollados, durante el transcurso de esta década, los principios básicos de la tecnología "Water Pinch" e integración de procesos. Estos principios han sido adaptados para el desarrollo de este modelo de optimización, en los siguientes enunciados.

### **8.1 REUTILIZACIÓN DIRECTA DE LAS AGUAS DE PROCESO**

Las aguas de proceso pueden ser directamente reutilizadas si cumplen con las condiciones de máxima concentración de contaminante permitida en otro proceso, además, en el caso de una refinería, existen corrientes cuyos contaminantes son importantes en algunos procesos, mientras que en otros procesos no se consideran debido a que no afectan el normal desarrollo de la operación. Estas corrientes pueden ser reutilizadas directamente.

Las aguas de proceso que normalmente se emplean más en la reutilización directa, son las purgas de los sistemas de generación de vapor y aguas de enfriamiento, debido al riguroso tratamiento al que son sometidas estas corrientes.

**Figura 1.** Diagrama de bloques de la reutilización directa

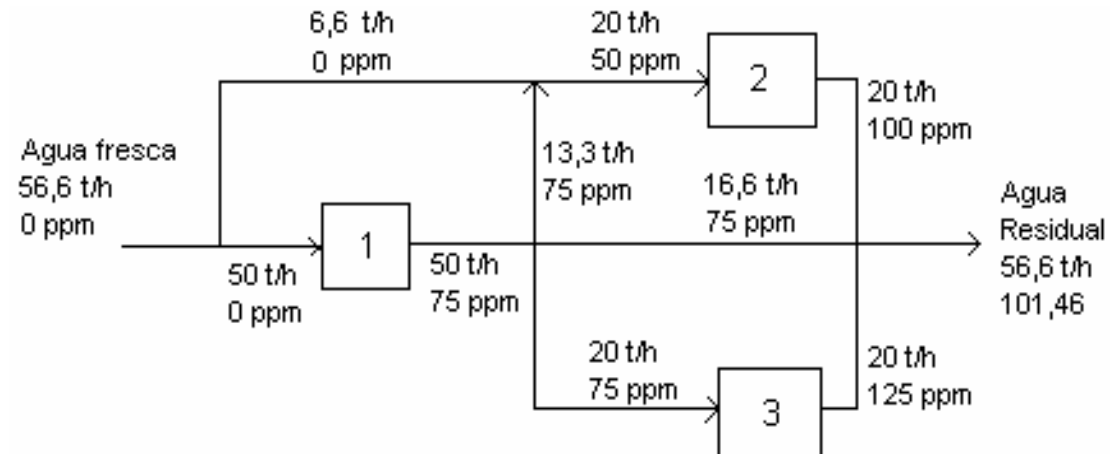


## 8.2 DISEÑO DE REDES INDUSTRIALES DE AGUAS DE PROCESO

Una correcta red industrial de aguas de proceso debe suplir la necesidad de agua en cada unidad y además debe cumplir con las limitaciones de concentración que se presentan en cada planta. Para tal efecto se deben considerar todas las mezclas y reutilizaciones posibles de corrientes existentes entre plantas de proceso.

Para un número  $n$  de unidades, las posibilidades son igual a  $n \times n$  mezclas y reutilizaciones posibles. Para tal efecto, este modelo de optimización está diseñado para manejar un número muy grande de variables, ya que el número de variables aumenta exponencialmente respecto al número de plantas.

**Figura 2.** Diagrama de bloques para un diseño de redes en un sistema con un contaminante.



### 8.3 REGENERACIÓN Y RECICLO DE AGUAS DE PROCESO

Reciclo se refiere a la directa reutilización de las aguas de un proceso en él mismo. No es factible, en términos de ingeniería, que las aguas de un proceso se reciclen totalmente, pero si es posible que se recicle un cierto porcentaje de ésta o que se recicle después de un pretratamiento o regeneración.

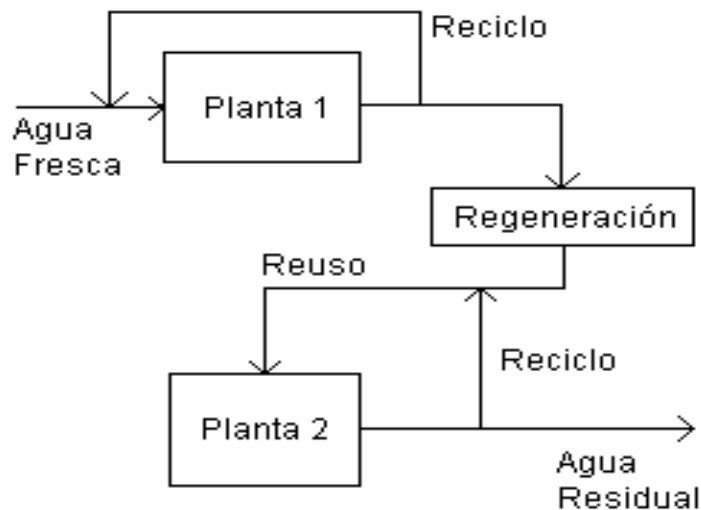
Regeneración se refiere a aquel tratamiento intermedio que remueve los contaminantes que no permiten su directa reutilización. La regeneración permite la total o parcial reutilización de una corriente con un costo mucho menor al del agua fresca.

Para reciclar una corriente se debe realizar un pretratamiento o un mezclado, que puede ser total o parcial, con otra corriente del proceso; de ésta manera se mantiene constante y baja la carga remanente total de contaminante en el sistema.

Las posibilidades son múltiples, qué porcentaje de la corriente debe ser recirculado directamente o regenerado o ambas. La respuesta a esta incógnita se puede encontrar en función del mínimo de consumo de agua fresca, que es la más costosa; pero también se puede encontrar en función de la mínima producción de agua residual.

El reciclo es la forma más económica de minimizar el consumo de agua fresca en un proceso, debido a que, en la mayoría de los casos, para reciclar una corriente basta solo con abrir una o varias válvulas en la red de tuberías. Este es el caso de refinerías como la GCB, que poseen una extensa y completa red de tuberías.

**Figura 3.** Diagrama de bloques de procesos con regeneración y reciclo



#### **8.4 REDUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL EN SISTEMAS CON MÚLTIPLES CONTAMINANTES**

El principal concepto desarrollado para la reducción de agua residual en sistemas con múltiples contaminantes, se conoce como *transferencia*

*proporcional de masa*. El ejemplo más claro para explicar este concepto dice que si un porcentaje X de la carga másica total de contaminante A en la corriente de un proceso se transfiere a otra corriente; de igual manera, se transfiere el mismo porcentaje X de la carga másica total de los demás contaminantes.

De forma implícita, este concepto nos indica que la relación concentración-masa es lineal en el mezclado de diferentes corrientes para un mismo contaminante; es decir, que todos los contaminantes tienen una concentración independiente, a excepción, en caso extremo, que algunos contaminantes sean reactivos entre sí y cambien las características de la corriente.

Actualmente, las refinerías manejan una gran cantidad de contaminantes en sus aguas. Se sabe que en algunos procesos ciertos contaminantes son importantes y en otros no. Pero, como ya se ha discutido anteriormente, todos los contaminantes son independientes entre sí; lo cual implica que, sin importar si son importantes o no lo son, cada uno representa independientemente una restricción más que el modelo debe cumplir. Un mayor número de contaminantes plantea un modelo de optimización más complicado y con más variables.

El número de contaminantes que se consideran en un proceso le implican al modelo un igual número de pretratamientos para su regeneración. Un correcto diseño de un modelo de optimización debe considerar todas las posibles regeneraciones en cualquier parte del proceso para todos los contaminantes.

## **8.5 REDUCCIÓN DE AGUA RESIDUAL A TRAVÉS DE OPTIMIZACIÓN MATEMÁTICA**

La reducción de agua residual a través de optimización matemática es simplemente la aplicación de todos los conceptos explicados anteriormente con un buen análisis ingenieril del proceso al cual se va a aplicar. Para su aplicación se desarrollaron los siguientes criterios.

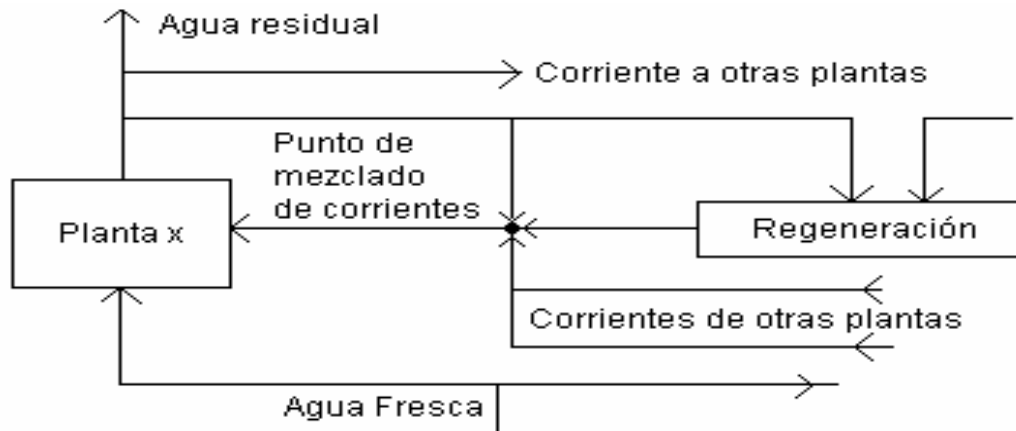
- **Análisis del proceso a optimizar:** El proceso se analiza con el fin de determinar cuales y cuantas plantas se deben considerar en el modelo. Se deben considerar las plantas más representativas en lo que respecta a consumo de agua y generación de agua residual. Es muy importante tener en cuenta las plantas de tratamiento de agua, los sistemas de generación de vapor, las aguas de enfriamiento y las fuentes naturales de este líquido.

No solamente las refinerías, sino una gran cantidad de los procesos en las industrias actuales, poseen una gran cantidad de efluentes. Muchos de estos efluentes no son representativos ante la gran cantidad de agua que maneja la planta, por lo tanto se deben escoger los que sean más importantes para el proceso; los que realmente representen una posible disminución en el consumo de agua o generación de agua residual. Esta medida también agiliza el modelo. Si utilizáramos todas las corrientes que se presentan en una refinería, la cantidad de variables que tendría el modelo sería del orden de 1'000000 o más y difícilmente un ordenador normal podría trabajar con esa cantidad de operaciones.

- **Desarrollo de los balances:** Para el desarrollo de los balances se deben considerar todas las diferentes posibilidades existentes para minimizar el consumo de agua y generación de agua residual; es decir, se debe considerar la recirculación, la reutilización directa, la regeneración y el mezclado de corrientes, todas al mismo tiempo.

Luego se desarrollan los balances de agua y de componentes con el fin de cumplir las condiciones que cada planta exige.

**Figura 4.** Esquema de minimización de agua en una planta x con un solo contaminante, para un proceso de n plantas.



Este es un ejemplo de las restricciones de concentración que se presentan en cada planta de un proceso:

$$\begin{aligned}
 a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n &\leq b_1 \\
 a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n &\leq b_2 \\
 a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n &\leq b_m \\
 x_1, x_2, \dots, x_n &\geq 0
 \end{aligned}$$

$x$  corresponde a las corrientes que entran a la planta,  $a$  corresponde a algún contaminante y  $b$  es la relación contaminante límite.

- **Determinación del objetivo a minimizar:** El objetivo a minimizar puede ser el consumo de agua fresca o la generación de agua residual. Pero en el caso de grandes procesos industriales, donde existen varios tipos de lo que conocemos como agua fresca, el objetivo a minimizar debe estar en función de los costos de los diferentes tipos de agua. Se pueden incluir en estos costos, los costos de tubería y de bombeo. El agua con mayor tratamiento es la más costosa, el agua recirculada prácticamente no tiene

costo, el agua regenerada generalmente es más económica que el agua fresca.

Este es un ejemplo de una función objetivo donde  $c$  corresponde a los costos de cada corriente de agua  $x$ .

$$f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

- **Análisis post-optimización:** Es posible que los valores mínimos que resuelven el modelo no sean apropiados para un proceso real, como corrientes muy pequeñas o recirculaciones muy altas (superiores al 80%). Las recirculaciones muy altas se dan frecuentemente cuando la diferencia entre la concentración de entrada y salida es muy pequeña, debido a que la solución óptima tiende a la mayor recirculación posible. Para cualquiera de los dos casos, el modelo debe permitir modificar las condiciones del proceso, como restringir las corrientes a un valor mínimo o restringir las recirculaciones a un valor máximo, por ejemplo, del 70%.

## **9. DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DE USO DE AGUA INDUSTRIAL**

A través de los principios de optimización del uso de agua industrial desarrollados en el transcurso de este trabajo y explicados anteriormente, se ha desarrollado un modelo computacional compatible con la herramienta de optimización Solver de Microsoft Excel. Este modelo ha sido desarrollado a través de los siguientes criterios.

### **9.1 ANÁLISIS DE PROCESOS Y EFLUENTES EN LA GCB**

Los procesos en la GCB fueron analizados con el objeto de determinar las plantas a considerar en el modelo, basados en el más reciente mapa de aguas de la refinería. Los criterios de selección fueron el consumo de agua y la producción de agua residual. Se seleccionaron también, los sistemas de generación de vapor, los sistemas de aguas de enfriamiento y las plantas de tratamiento de agua. Por último, se consideró el río Magdalena como única fuente de agua industrial.

Con la colaboración del ICP\*, se realizó un estudio del mapa de aguas de la GCB, con el fin de determinar los efluentes principales de las plantas previamente seleccionadas. La selección de efluentes se realizó en función de su capacidad de reutilización, si el agua estaba demasiado contaminada se consideraba como agua residual. Únicamente se seleccionaron descargas continuas.

---

\* Instituto Colombiano del petróleo

### **9.1.1 Plantas de agua**

De manera práctica, se asume la existencia de una sola planta de tratamiento de agua industrial. Esta planta genera cuatro tipos diferentes de agua: potable, suavizada, clarificada y desmineralizada. Los procesos para su generación ya han sido previamente expuestos en este trabajo. El agua clarificada se utiliza en la GCB, principalmente para los sistemas de enfriamiento; el agua desmineralizada, es exclusiva para la generación de vapor y el agua suavizada se utiliza en otros procesos como el desalado de crudo y lavado de gases. Para tal efecto, la planta de tratamiento de agua, se dividió en tres procesos según la calidad del agua:

- Desmineralización
- Suavización
- Clarificación

Al mismo tiempo, estos procesos podrían emplearse como procesos de regeneración, si las condiciones de concentración lo permiten.

### **9.1.2 Toppings**

Hay cinco topping en la GCB, las cinco unidades requieren servicio de agua para utilizar en el desalado de crudo. También tienen como efluentes los condensados de la inyección directa de vapor al crudo para su destilación en las columnas de destilación atmosférica y destilación al vacío; y el agua residuo del desalado.

### **9.1.3 Cracking**

Las unidades de cracking de la GCB tienen un gran número de efluentes por lo cual se seleccionaron los más importantes en cuanto a cantidad y reutilizabilidad.

- La unidad cracking modelo IV D-350 corresponde a una caldera para producción de vapor que se inyecta al reactor de fluidización catalítica. Su efluente corresponde a condensados ricos en sulfuros y amoníaco.
- Las aguas de la unidad cracking modelo IV D-339 corresponden a aguas de enfriamiento de bombas.
- Las aguas de la unidad cracking orthoflow T-501 y E-567 corresponden a aguas de lavado de gases de cima, contienen sulfuros y amoníaco.
- La unidad cracking modelo UOP-1 E-2700 corresponde a una caldera para producción de vapor igual que el modelo IV D-350.
- En la recuperación de vapores de UOP-1 se hace un lavado de gases de cima para retirar sulfuros y amoníaco.

#### **9.1.4 Petroquímica**

- **Generación de hidrógeno:** El proceso de generación de hidrógeno requiere agua de alta calidad como reactivo y tiene como efluentes aguas agrias de lavado de gases.
- **Tratamientos con hidrógeno, nafténicos y parafínicos:** Estos tres tratamientos consisten en el mismo proceso con tres cargas diferentes. El agua es utilizada en estos procesos como agua de lavado de gases de cima; los efluentes poseen sulfuros, amoníaco y oxígeno.

#### **9.1.5 Procesos de regeneración**

Los procesos de clarificación, suavización y desmineralización pueden emplearse en la regeneración del agua residual, si las condiciones de concentración lo permiten. También, la GCB posee una planta para tratamiento de aguas agrias por proceso de despojamiento, previamente explicado en este trabajo. Otro proceso de regeneración es la remoción de hidrocarburos de la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR.

En la siguiente tabla se recopilan los efluentes seleccionados y sus características.

**Tabla 7.** Efluentes seleccionados con sus características.

	Planta	Entrada		Salida	
		gpm	calidad	gpm	calidad
1	Clarificación	13550	magdalena		clarificada
2	Suavización	1450	clarificada		suavizada
3	Desmineralización	1830	clarificada		desmineralizada
4	Generación de vapor	1500	desmineralizada	265	purgas calderas
5	TE - 831	650	clarificada	148	purgas torres
6	TE – 890/850	1192	clarificada	222	purgas torres
7	TE - 2945	1342	clarificada	75	purgas torres
8	Topping 150	29	clarificada	29	aceitosa, Cl <sup>-</sup>
9	Condensado			38,6	aceitosa
10	Topping 200	36	clarificada	36	aceitosa, Cl <sup>-</sup>
11	Condensado			28,4	aceitosa
12	Topping 250	35	clarificada	35	aceitosa, Cl <sup>-</sup>
13	Condensado			18,9	aceitosa
14	Topping 2000	5,2	clarificada	5,2	aceitosa, Cl <sup>-</sup>
15	Condensado			17,8	aceitosa
16	Topping 2100	14,6	clarificada	14,6	aceitosa, Cl <sup>-</sup>
17	Condensado			14,7	aceitosa

18	Tratamientos con H <sub>2</sub>	10	suavizada	10	agria
19	Planta de ácido	217,1	clarificada	216,1	ácidas
20	Crac. mod. IV D-350	94,2	suavizada	59,3	agria
21	Crac. mod. IV D-339	50,82	clarificada	42,8	aceitosa
22	Crac. orthoflow T-501	100	suavizada	164	agria
23	Crac. orthoflow E-567	50	suavizada	50	purga
24	Crac. UOP-1 E-2700	177	suavizada	113	agria
25	Aguas agrias	360	agria	360	agria despojada
26	Trat parafinic con H <sub>2</sub>	10	suavizada	10	agria
27	Trat naftenic con H <sub>2</sub>	10	suavizada	10	agria
28	Generac de H <sub>2</sub>	32	suavizada	82	agria
29	Recuperac. vapores	54	suavizada	54	agria
30	Remoción HC		aceitosa		

### 9.1.6 Contaminantes

Se realizó un estudio para determinar los contaminantes más importantes en cada uno de los procesos seleccionados. Para tal efecto, se analizaron los datos históricos de las plantas seleccionadas y se tomaron los diez contaminantes más representativos a los procesos que se llevan a cabo en la refinería. Los contaminantes son los siguientes:

- Sólidos suspendidos
- Sólidos disueltos
- Cloruros
- Sulfuros
- Amoniaco

- Sílice
- Hidrocarburos
- Dureza total
- Fenoles
- Oxígeno disuelto

La temperatura no fue seleccionada debido a que en la mayoría de los procesos, antes mencionados, se mantiene alrededor de la temperatura ambiente (35 – 40°C), las purgas de calderas y condensados de vapor son las únicas corrientes que poseen una temperatura mayor; sin embargo para su tratamiento y por razones de seguridad, ésta debe disminuir por debajo de los 50°C. Además las purgas de calderas normalmente pasan por una piscina de neutralización antes de ser enviadas a la PTAR y las legislaciones ambientales no permiten descargas con una temperatura superior a 40°C.

La concentración del ión hidrógeno o pH no fue tenido en cuenta debido a que éste no se mezcla linealmente ya que depende de muchos factores, como la presencia de otros iones que determinan la capacidad amortiguadora del agua, entre otros. Otros modelos de optimización de agua industrial, como el “water pinch”, tampoco tienen en cuenta el pH por la misma razón. El pH promedio de los efluentes seleccionados varía entre 6 y 9,5; valor máximo para las aguas agrías; sin embargo, la reutilizabilidad de estas aguas la determina la alta presencia de iones sulfuro y amonio.

- **Concentraciones de los efluentes de salida.** Para determinar las concentraciones de los efluentes de salida se promediaron los datos históricos. En algunas plantas no se contaba con la caracterización completa de todos los contaminantes, únicamente con la información de los contaminantes más importantes del proceso; razón por la cual

se buscó en la literatura los valores típicos en una refinería o fueron tomados de los informes de evaluación de efluentes en la GRC<sup>[1]</sup>.

- **Condiciones de concentración límite.** Para determinar las concentraciones de operación, se hizo un análisis con el fin de determinar la receptibilidad de cada contaminante en cada una de las plantas; es decir, la carga máxima a la que puede operar normalmente, de esta manera se determinó un valor específico, para cada planta, de concentración límite.
  - o Clarificación: Los procesos de clarificación no permiten la entrada de ningún tipo de hidrocarburo debido a que pueden interferir con algunos procesos intermedios como la floculación y el filtrado. Puede recibir concentraciones altas de sólidos suspendidos, alrededor de 800 ppm y concentraciones altas de iones y cationes<sup>[2]</sup>.
  - o Suavización y Desmineralización: Son procesos muy exigentes donde no pueden existir hidrocarburos y se requieren concentraciones muy bajas de sólidos suspendidos, las concentraciones de sólidos disueltos y otros iones no deben superar las 200 ppm ya que se podrían presentar problemas como el taponamiento de las zeolitas<sup>[2]</sup>.
  - o Sistemas de enfriamiento y calderas: Son los procesos que demandan la mejor calidad de agua ya que se pueden presentar problemas como ensuciamiento y formación de escamas, estos procesos ya fueron explicados en el capítulo 2.
  - o Desaladores: Son probablemente los procesos que permiten una mayor reutilización del agua. Debido a la función que debe cumplir, no es importante que tenga moderadas concentraciones de hidrocarburos, dureza, sulfuros o sólidos

disueltos; estas concentraciones pueden estar del orden de 500 ppm.

- o Aguas de lavado de gases: Las aguas de lavado de gases no requieren una alta calidad. Pueden tener concentraciones del orden de 20 ppm de sulfuros, amoníaco, cloruros y sólidos disueltos; de esta manera no se generan problemas en los equipos de contacto gas-líquido.

La información completa de cada una de las plantas y sus contaminantes se encuentra en el anexo 1.

## **9.2 ECUACIONES DE REUTILIZACIÓN DE AGUA INDUSTRIAL**

Las ecuaciones de reutilización de agua industrial se desarrollaron en función de los principios de reutilización directa, recirculación, regeneración y mezclado de corrientes.

Algunos procesos utilizan o generan aguas dentro de un determinado rango, es decir, sus descargas no son de un valor exacto, es un valor fluctuante debido a innumerables factores que pueden ser, industriales o ambientales; por lo tanto, el modelo trabaja las entradas y las descargas dentro de un rango de volumen.

Con un total de 30 plantas y de 10 contaminantes diferentes, el modelo trabaja con un total de 960 variables y 415 restricciones, sin embargo puede ser fácilmente adaptado a cualquier otro proceso industrial.

### **9.2.1 Nomenclatura**

$x, z = [1 \dots 30]$

Fw.  $x$  = agua fresca del río Magdalena que entra a la planta  $x$

$ww.x$  = agua residual que sale de la planta  $x$

$x.z$  = corriente que sale de la planta  $x$  y entra en la planta  $z$

$x.E.wma$  = Entrada máxima de agua en la planta  $x$

$x.E.wmin$  = Entrada mínima de agua en la planta  $x$

$x.S.wma$  = Salida máxima de agua en la planta  $x$

$x.S.wmin$  = Salida mínima de agua en la planta  $x$

$y = [1 \dots 10]$

$x.E.Cy$  = planta  $x$ , concentración máxima permitida de contaminante  $y$

$x.S.Cy$  = planta  $x$ , concentración de contaminante  $y$  en la corriente de salida

$Fw.Cy$  = concentración de contaminante  $y$  en el agua fresca

### 9.2.2 Procesos

En los procesos, la cantidad de agua que entra y sale varía en un pequeño rango.

#### - Condiciones de entrada

$$fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \leq x.E.wma$$

$$fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \geq x.E.wmin$$

$$x = [1 \dots 30]$$

En estas ecuaciones vemos que las recirculaciones serían las variables donde  $i.x$  concuerdan en un mismo número, por ejemplo 5.5, 6.6 etc.

$$fw.x[fw.Cy] + \sum_{i=1}^{30} i.x[i.S.Cy] \leq \left( fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \right) [x.E.Cy]$$

$$x = [1 \dots 30]$$

$$y = [1 \dots 10]$$

- **Condiciones de salida**

$$ww.x + \sum_{i=1}^{30} x.i \leq x.S.wma$$

$$ww.x + \sum_{i=1}^{30} x.i \geq x.S.wmin$$

$$x = [1 \dots 30]$$

### 9.2.3 Tratamientos de agua

En los tratamientos, la cantidad de agua que entra y sale varía de cero hasta un valor de máximo que corresponde a la capacidad máxima de la planta. Esto es con el propósito, de que la optimización determine; con las nuevas reutilizaciones y otros; menores volúmenes de tratamiento de aguas que pueden ser tratamientos para uso industrial o de aguas residuales.

- **Condiciones de entrada**

$$fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \leq x.E.wma$$

$$fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \geq 0$$

$$x = [1 \dots 30]$$

$$fw.x[fw.Cy] + \sum_{i=1}^{30} i.x[i.S.Cy] \leq \left( fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \right) [x.E.Cy]$$

$$x = [1 \dots 30]$$

$$y = [1 \dots 10]$$

- **Condiciones de salida**

$$ww.x + \sum_{i=1}^{30} x.i = FS \left( fw.x + \sum_{i=1}^{30} i.x \right)$$

$$x = [1 \dots 30]$$

FS corresponde a la fracción de salida de agua respecto a la cantidad de agua que está entrando al proceso, es decir, el porcentaje de la corriente de entrada, que sale después de su purificación.

Para los procesos de clarificación es alrededor del 93%; para suavización, desmineralización, despojamiento de aguas agrias y remoción de HC, es alrededor del 90%.

#### 9.2.4 Función objetivo

La función objetivo contiene los costos de los diferentes tipos de agua, que en la GCB son los siguientes con corte a enero del 2003:

**Tabla 8.** Costo del agua en la GCB

Servicio	\$ / kilogalón
Agua cruda	652
Agua clarificada	1482
Agua suavizada	6160
Agua desmineralizada	6160
Agua residual	93,61

Estos costos indican lo que le cuesta a la refinería cada tipo de agua, por lo tanto, incluyen los costos procesamiento y transporte hasta las plantas de tratamiento. El costo del agua cruda hace referencia a lo que le cuesta a la refinería tomar agua del río Magdalena.

El agua que se reutiliza en otro proceso cuesta \$ negativos del agua que está reemplazando menos \$ de agua que no se envía como agua residual, es decir, si el agua reutilizada reemplaza cierta cantidad de agua clarificada que normalmente emplea el proceso, esta corriente cuesta ( -\$1,482 - \$0,09361 ) = - \$1,5756 / galón.

Las unidades de los costos deben estar en [unidad moneda /unidad volumen].

Como un trabajo complementario se desarrolló otra función objetivo que contiene, además de los costos de agua, los costos de transporte en los que se incluye tubería y bombeo.

- **Costos de tubería y bombeo.** Para las plantas de agua, el agua residual y el agua cruda, únicamente se calcularon los costos de bombeo debido a que el equipo de tuberías y bombas ya existe. Para las demás plantas se calcularon los costos de envío a un posible punto de distribución [ver anexo 3.]. Utilizando el planimétrico de la GCB se calcularon las distancias siguiendo el drag de tubería.

El punto de distribución tiene como objetivo la correcta distribución y control de calidad del agua requerida en los procesos, además; independiza los requerimientos de agua del funcionamiento de las plantas en el caso de que algún proceso se detenga, o cambien las condiciones de operación y se excedan los parámetros de calidad, que pueden ser muy exigentes, en algunos procesos.

Peter y Timmerhaus<sup>[3]</sup> afirman que para líquidos de baja viscosidad, en tuberías de acero cédula 40, la velocidad económicamente óptima se encuentra en el rango de 1,8 a 2,4 m/s. Para el cálculo de la caída de presión, la potencia de las bombas y el diámetro real de tubería; se utilizó el software Hysys 2.4; los cálculos se realizaron tomando como punto de partida las velocidades anteriores; de esta manera se encontró un diámetro de tubería que correspondiera a una condición de trabajo segura.

Se seleccionó tubería de acero al carbono cédula 40, que es la que se utiliza en la GCB para transportar agua, los precios fueron cotizados por ACIPCO.

**Tabla 9.** Costo de la tubería de acero al carbono cédula 40

<b>Diámetro (in)</b>	<b>Costo (\$ / m)</b>
4	58000
6	75000
8	90000
10	105000

Los costos de las bombas fueron cotizados por ASHFLOW Bombas Industriales.

El costo de la energía en la GCB es de 95 \$/KW, valor que se empleó para que los costos de bombeo tuvieran unidades de \$/galón.

Para este proyecto se consideró un financiamiento de la deuda para un periodo de 5 años con un interés del 26% E.A. El total de la deuda con intereses, se agregó a los costos de transporte de agua durante el periodo de financiación. Los costos de mantenimiento son aproximadamente 10% del costo inicial para las bombas y de 5% del costo inicial para las tuberías; por año. El total de costos de tubería, bombas y mantenimiento también se transformó a unidades de \$/galón. La hoja de cálculo con la totalidad de los costos se encuentra en el anexo 2. de este trabajo.

## 10. RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN

### 10.1 OPTIMIZACIÓN EN FUNCION DE LOS COSTOS DE AGUA

**Tabla 10.** Resultados de la optimización en función de los costos de agua.

<b>PLANTA 1. CLARIFICACION</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua cruda del Magdalena	5065,67	Suavización	345,50
		Desmineralización	1700,00
		T.E. 831	550,42
		T.E. 890 / 850	984,92
		T.E. 2945	1130,23
<b>Total</b>	<b>5065,57</b>	<b>Total</b>	<b>4711,07</b>

<b>PLANTA 2. SUAVIZACION</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Clarificación	345,50	Trat. con Hidrógeno	4,15
		Crack mod IV D350	93,00
		Crack orthofl. T501	73,09
		Crack orthofl. E567	19,60
		Crack UOP1 E2700	65,65
		Trat. parafin con H <sub>2</sub>	3,74
		Trat. naften con H <sub>2</sub>	3,38
		Generación de H <sub>2</sub>	28,46
		Recuper de vapores	19,88
<b>Total</b>	<b>345,50</b>	<b>Total</b>	<b>310,95</b>

<b>PLANTA 3. DESMINERALIZACIÓN</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Clarificación	1700	Generación Vapor	1500
<b>Total</b>	<b>1700</b>	<b>Total</b>	<b>1500</b>

<b>PLANTA 4. GENERACION DE VAPOR</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Desmineralización	1500	Trat. con Hidrógeno	0,97
		Planta de ácido	192,32
		Crack mod IV D339	38,42
		Crack orthofl. E567	4,57
		Crack UOP1 E2700	15,32
		Trat. parafin con H <sub>2</sub>	0,87
		Trat. naften con H <sub>2</sub>	0,79
		Generación de H <sub>2</sub>	2,11
		Recuper de vapores	4,64
<b>Total</b>	<b>1500</b>	<b>Total</b>	<b>260</b>

<b>PLANTA 5. TORRE DE ENFRIAMIENTO 831</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Clarificación	550,42	Agua residual	42,36
Cond Top 200	0,36	Topping 150	27,85
Cond Top 250	19,50	Topping 250	34,96
Planta de ácido	9,85	Topping 2000	4,87
Aguas agrias	9,86	Topping 2100	13,92
X	X	Planta de ácido	3,97
X	X	Crack mod IV D339	2,07
<b>Total</b>	<b>589,99</b>	<b>Total</b>	<b>4711,07</b>

<b>PLANTA 6. TORRES DE ENFRIAMIENTO 890 / 850</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 890 / 850	984,92	Agua residual	156,81
Cond Top 200	9,05	Topping 200	34,92
Planta de ácido	12,55	Planta de ácido	1,92
Crack mod IV D339	12,86	Remoción HC	26,36
Aguas agrias	41,63	X	X
<b>Total</b>	<b>1061,01</b>	<b>Total</b>	<b>220</b>

<b>PLANTA 7. TORRE DE ENFRIAMIENTO 2945</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 2945	1130,23	Agua residual	70,00
Cond Top 200	19,58	X	X
Cond Top 2000	19,00	X	X
Cond Top 2100	17,00	X	X
Planta de ácido	13,20	X	X
Crack mod IV D339	26,48	X	X
Crack orthofl. E567	45,95	X	X
Aguas agrias	28,56	X	X
<b>Total</b>	<b>1300</b>	<b>Total</b>	<b>70</b>

<b>PLANTA 8. TOPPING 150</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Topping 200	0,07	Agua residual	27,46
Trat. naften con H <sub>2</sub>	1,41	Planta de ácido	0,54
Recuper de vapores	0,43	X	X
Aguas agrias	0,24	X	X
<b>Total</b>	<b>2,15</b>	<b>Total</b>	<b>28</b>

<b>PLANTA 9. CONDENSADO TOPPING 150</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 890 / 850	39,00
X	X	X	X
X	X	X	X
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>39</b>

<b>PLANTA 10. TOPPING 200</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 890 / 850	34,92	Agua residual	34,77
Crack mod IV D350	0,05	Topping 150	0,07
Trat. naften con H <sub>2</sub>	2,04	Topping 250	0,12
X	X	Topping 2100	0,04
<b>Total</b>	<b>37,01</b>	<b>Total</b>	<b>35</b>

<b>PLANTA 11. CONDENSADO TOPPING 200</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 831	0,36
X	X	T.E. 890 / 850	9,05
X	X	T.E. 2945	19,58
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>29</b>

<b>PLANTA 12. TOPPING 250</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	34,96	Agua residual	36
Topping 200	0,12	X	X
Trat. parafin con H <sub>2</sub>	1,93	X	X
<b>Total</b>	<b>37,01</b>	<b>Total</b>	<b>36</b>

<b>PLANTA 13. CONDENSADO TOPPING 250</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	Cond Top 250	19,50
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>19,50</b>

<b>PLANTA 14. TOPPING 2000</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	4,87	Agua residual	5,00
Aguas agrias	0,88	X	X
Trat. naften con H <sub>2</sub>	0,17	X	X
Recuper de vapores	0,08	X	X
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>Total</b>	<b>5</b>

<b>PLANTA 15. CONDENSADO TOPPING 2000</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 2945	19,00
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>19</b>

<b>PLANTA 16. TOPPING 2100</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	13,92	Agua residual	13,69
Topping 200	0,04	Remoción HC	0,31
Aguas agrias	0,14	X	X
Trat. naften con H <sub>2</sub>	0,46	X	X
Recuper de vapores	0,44	X	X
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>Total</b>	<b>14</b>

<b>PLANTA 17. CONDENSADO TOPPING 2100</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 2945	17,00
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>17</b>

<b>PLANTA 18. TRATAMIENTOS CON HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	4,15	Agua residual	9,95
Generación Vapor	0,97	Crack orthofl. T501	0,05
Aguas agrias	4,88	X	X
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>Total</b>	<b>10</b>

<b>PLANTA 19. PLANTA DE ÁCIDO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Generación Vapor	192,32	Agua residual	168,28
T.E. 831	3,97	T.E. 831	9,85
T.E. 890	1,92	T.E. 890 / 845	12,55
Topping 150	0,54	T.E. 2945	13,20
Remoción HC	17,45	Reciclo	1,81
X	X	Aguas agrias	10,31
<b>Total</b>	<b>216,2</b>	<b>Total</b>	<b>216</b>

<b>PLANTA 20. CRACKING MOD IV D350</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	93,00	Agua residual	58,95
X	X	Topping 200	0,05
<b>Total</b>	<b>93</b>	<b>Total</b>	<b>59</b>

<b>PLANTA 21. CRACKING MOD IV D339</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Generación Vapor	38,42	T.E. 890 / 850	12,86
T.E. 831	2,07	T.E. 2945	26,48
Aguas agrias	0,97	Reciclo	3,67
Remoción HC	6,88	X	X
<b>Total</b>	<b>48,34</b>	<b>Total</b>	<b>43</b>

<b>PLANTA 22. CRACKING ORTHOFLOW T501</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	73,09	Agua residual	30,40
Crack orthofl. E567	5,62	Aguas agrias	132,25
Aguas agrias	16,24	Remoción HC	0,35
<b>Total</b>	<b>94,95</b>	<b>Total</b>	<b>163</b>

<b>PLANTA 23. CRACKING ORTHOFLOW T567</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	19,60	T.E. 2945	45,95
Generación Vapor	4,57	Crack orthofl. T501	5,62
Aguas agrias	21,02	Generación de H <sub>2</sub>	0,43
Generación de H <sub>2</sub>	2,81	X	X
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>Total</b>	<b>52</b>

<b>PLANTA 24. CRACKING UOP-1 E 2700</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	65,65	Agua residual	112,00
Generación Vapor	15,32	X	X
Aguas agrias	34,82	X	X
Generación de H <sub>2</sub>	59,21	X	X
<b>Total</b>	<b>175</b>	<b>Total</b>	<b>112</b>

<b>PLANTA 25. AGUAS AGRIAS</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Planta de ácido	10,31	T.E. 831	19,86
Crack orthofl. T501	132,25	T.E. 890 / 850	41,63
Trat. parafin con H <sub>2</sub>	7,07	T.E. 2945	28,56
Trat. naften con H <sub>2</sub>	4,92	Topping 150	0,24
Recuper de vapores	52,06	Topping 2000	0,88
X	X	Topping 2100	0,14
X	X	Trat. con Hidrógeno	4,88
X	X	Crack mod IV D339	0,97
X	X	Crack orthofl. T501	16,24
X	X	Crack orthofl. E567	21,02
X	X	Crack UOP1 E2700	34,82
X	X	Trat. parafin con H <sub>2</sub>	4,39
X	X	Trat. naften con H <sub>2</sub>	1,79
X	X	Recuper de vapores	10,54
<b>Total</b>	<b>206,61</b>	<b>Total</b>	<b>185,95</b>

<b>PLANTA 26. TRATAMIENTO PARAFINICO CON HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	3,74	Topping 250	1,93
Generación Vapor	0,87	Aguas agrias	7,07
Aguas agrias	4,39	X	X
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>Total</b>	<b>9</b>

<b>PLANTA 27. TRATAMIENTO NAFTENICO CON HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	3,38	Topping 150	1,41
Generación Vapor	0,79	Topping 200	2,04
Aguas agrias	1,79	Topping 2000	0,17
Generación de H <sub>2</sub>	3,05	Topping 2100	0,46
X	X	Trat. naften con H <sub>2</sub>	4,92
<b>Total</b>	<b>9,01</b>	<b>Total</b>	<b>9</b>

<b>PLANTA 28. GENERACION DE HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	28,46	Crack orthofl. E567	2,81
Generación Vapor	2,11	Crack UOP1 E2700	59,21
Crack orthofl. E567	0,43	Trat. naften con H <sub>2</sub>	3,05
X	X	Recuper de vapores	17,93
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>Total</b>	<b>83</b>

<b>PLANTA 29. RECUPERACION DE VAPORES</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	19,88	Topping 150	0,43
Generación Vapor	4,64	Topping 2000	0,08
Aguas agrias	10,54	Topping 2100	0,44
Generación de H <sub>2</sub>	17,93	Aguas agrias	52,06
<b>Total</b>	<b>53</b>	<b>Total</b>	<b>53</b>

<b>PLANTA 30. REMOCION DE HIDROCARBUROS ( PTAR )</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 890 / 850	26,36	Planta de ácido	17,45
Topping 2100	0,31	Crack mod IV D339	6,88
Crack orthofl. T501	0,35	X	X
<b>Total</b>	<b>27,02</b>	<b>Total</b>	<b>24,33</b>

## 10.2 OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y TRANSPORTE

**Tabla 11.** Resultados de la optimización en función de los costos de agua y transporte

<b>PLANTA 1. CLARIFICACIÓN</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua cruda del Magdalena	5089,48	Suavización	342,98
		Desmineralización	1700,00
		T.E. 831	541,18
		T.E. 890 / 850	982,77
		T.E. 2945	1166,29
<b>Total</b>	<b>5089,48</b>	<b>Total</b>	<b>4733,22</b>

<b>PLANTA 2. SUAVIZACIÓN</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Clarificación	342,98	Trat. con H <sub>2</sub>	4,15
		Crack mod IV D350	93,00
		Crack orthofl. T501	70,82
		Crack orthofl. E567	18,01
		Crack UOP1 E2700	65,65
		Trat. parafin con H <sub>2</sub>	3,74
		Trat. naften con H <sub>2</sub>	3,74
		Generación de H <sub>2</sub>	28,46
		Recua. de vapores	21,12
<b>Total</b>	<b>342,98</b>	<b>Total</b>	<b>308,69</b>

<b>PLANTA 3. DESMINERALIZACIÓN</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Clarificación	1700	Generación Vapor	1500
<b>Total</b>	<b>1700</b>	<b>Total</b>	<b>1500</b>

<b>PLANTA 4. GENERACIÓN DE VAPOR</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Desmineralización	1500	T.E. 2945	7,75
		Trat. con H <sub>2</sub>	0,97
		Planta de ácido	196,91
		Crack mod IV D339	30,82
		Crack orthofl. T501	5,25
		Crack orthofl. E567	4,20
		Crack UOP1 E2700	15,32
		Trat parafin con H <sub>2</sub>	0,87
		Trat. naften con H <sub>2</sub>	0,87
		Recup. de vapores	4,93
<b>Total</b>	<b>1500</b>	<b>Total</b>	<b>270</b>

<b>PLANTA 5. TORRE DE ENFRIAMIENTO 831</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua de Magdalena	7,12	Topping 150	27,98
Clarificación	541,18	Topping 200	34,97
Cond Top 2000	17,86	Topping 250	35,97
Cond Top 2100	5,22	Topping 2000	5,00
Planta de ácido	9,10	Topping 2100	13,99
Aguas agrias	19,52	Planta de ácido	6,69
X	X	Crack mod IV D339	6,27
<b>Total</b>	<b>600</b>	<b>Total</b>	<b>130,87</b>

<b>PLANTA 6. TORRES DE ENFRIAMIENTO 890 / 850</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua de Magdalena	13,38	Agua residual	220,00
Clarificación	982,77	X	X
Cond Top 150	14,77	X	X
Cond Top 250	19,50	X	X
Planta de ácido	18,95	X	X
Crack orthofl. E567	32,94	X	X
Aguas agrias	17,70	X	X
<b>Total</b>	<b>1100</b>	<b>Total</b>	<b>220</b>

<b>PLANTA 7. TORRE DE ENFRIAMIENTO 2945</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua de Magdalena	15,28	Agua residual	70.00
Clarificación	1166,28	X	X
Generación Vapor	7,75	X	X
Cond Top 150	24,23	X	X
Cond Top 200	29	X	X
Cond Top 2000	1,14	X	X
Planta de ácido	21,20	X	X
Aguas agrias	35,11	X	X
<b>Total</b>	<b>1300</b>	<b>Total</b>	<b>70</b>

<b>PLANTA 8. TOPPING 150</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	27,97	Agua residual	28.00
Crack orthofl. T501	0,50	X	X
<b>Total</b>	<b>28,47</b>	<b>Total</b>	<b>28</b>

<b>PLANTA 9. CONDENSADO TOPPING 150</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 890/850	14,77
X	X	T.E. 2945	24,23
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>39</b>

<b>PLANTA 10. TOPPING 200</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	34,97	Agua residual	35.00
Crack orthofl. T501	0,63	X	X
<b>Total</b>	<b>35.6</b>	<b>Total</b>	<b>35</b>

<b>PLANTA 11. CONDENSADO TOPPING 200</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 890 / 850	29.00
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>29</b>

<b>PLANTA 12. TOPPING 250</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	35,97	Agua residual	36
Crack orthofl. T501	0,65	X	X
<b>Total</b>	<b>36,62</b>	<b>Total</b>	<b>36</b>

<b>PLANTA 13. CONDENSADO TOPPING 250</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 831	19,60
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>19,60</b>

<b>PLANTA 14. TOPPING 2000</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	5,00	Agua residual	5,00
Crack orthofl. T501	0,09	X	X
<b>Total</b>	<b>5,09</b>	<b>Total</b>	<b>5</b>

<b>PLANTA 15. CONDENSADO TOPPING 2000</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	T.E. 890 / 850	17,85
X	X	T.E. 2945	1,14
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>19</b>

<b>PLANTA 16. TOPPING 2100</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
T.E. 831	13,99	Agua residual	14,00
Crack orthofl. T501	0,25	X	X
<b>Total</b>	<b>14,24</b>	<b>Total</b>	<b>14</b>

<b>PLANTA 17. CONDENSADO TOPPING 2100</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
X	X	Agua residual	10,78
X	X	T.E. 831	5,22
<b>Total</b>	<b>0</b>	<b>Total</b>	<b>16</b>

<b>PLANTA 18. TRATAMIENTOS CON HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	4,15	Agua residual	10,00
Generación Vapor	0,97	X	X
Aguas agrias	4,88	X	X
<b>Total</b>	<b>10</b>	<b>Total</b>	<b>10</b>

<b>PLANTA 19. PLANTA DE ACIDO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua de Magdalena	6,69	Agua residual	155,81
Generación Vapor	196,91	T.E. 831	9,10
T.E. 831	6,69	T.E. 890 / 850	18,95
Crack mod IV D339	2,39	T.E. 2945	21,20
X	X	Reciclo	3,32
X	X	Crack mod IV D339	0,54
X	X	Aguas agrias	7,05
<b>Total</b>	<b>212.79</b>	<b>Total</b>	<b>216</b>

<b>PLANTA 20. CRACKING MOD IV D350</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	93,00	Agua residual	59,00
<b>Total</b>	<b>93</b>	<b>Total</b>	<b>59</b>

<b>PLANTA 21. CRACKING MOD IV D339</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua de Magdalena	1,79	Agua residual	29,04
Generación Vapor	30,82	Planta de ácido	2,39
T.E. 831	6,27	Reciclo	10,58
Planta de ácido	0,54	X	X
<b>Total</b>	<b>39,42</b>	<b>Total</b>	<b>42</b>

<b>PLANTA 22. CRACKING ORTHOFLOW T501</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	70,82	Agua residual	9,22
Generación Vapor	5,25	Topping 150	0,50
Planta de ácido	7,09	Topping 200	0,63
Crack orthofl. E567	18,64	Topping 250	0,65
X	X	Topping 2000	0,09
X	X	Topping 2100	0,25
X	X	Reciclo	0,30
X	X	Aguas agrias	151,35
<b>Total</b>	<b>101,8</b>	<b>Total</b>	<b>162,69</b>

<b>PLANTA 23. CRACKING ORTHOFLOW T567</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	18,01	T.E. 890 / 850	32,94
Generación Vapor	4,20	Crack orthofl. T501	18,64
Aguas agrias	9,55	Generación de H <sub>2</sub>	0,43
Generación de H <sub>2</sub>	16,24	X	X
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>Total</b>	<b>52</b>

<b>PLANTA 24. CRACKING UOP-1 E 2700</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	65,65	Agua residual	112,00
Generación Vapor	15,32	X	X
Aguas agrias	34,82	X	X
Generación de H <sub>2</sub>	59,21	X	X
<b>Total</b>	<b>175</b>	<b>Total</b>	<b>112</b>

<b>PLANTA 25. AGUAS AGRIAS</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Agua de Magdalena	7,97	T.E. 831	19,52
Planta de ácido	7,09	T.E. 890 / 850	17,70
Crack orthofl. T501	151,35	T.E. 2945	35,11
X	X	Trat. con H <sub>2</sub>	4,88
X	X	Crack orthofl. E567	9,55
X	X	Crack UOP1 E2700	34,82
X	X	Trat. parafin con H <sub>2</sub>	4,39
X	X	Trat. naften con H <sub>2</sub>	4,39
X	X	Recup. de vapores	19,41
<b>Total</b>	<b>166,41</b>	<b>Total</b>	<b>149,77</b>

<b>PLANTA 26. TRATAMIENTO PARAFINICO CON HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	3,74	Agua residual	9
Generación Vapor	0,87	X	X
Aguas agrias	4,39	X	X
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>Total</b>	<b>9</b>

<b>PLANTA 27. TRATAMIENTO NAFTENICO CON HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	3,74	Agua residual	9
Generación Vapor	0,87	X	X
Aguas agrias	4,39	X	X
<b>Total</b>	<b>9</b>	<b>Total</b>	<b>9</b>

<b>PLANTA 28. GENERACION DE HIDROGENO</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	28,46	Crack orthofl. E567	16,24
Generación Vapor	2,11	Crack UOP1 E2700	59,21
Crack orthofl. E567	0,43	Recup. de vapores	7,55
<b>Total</b>	<b>31</b>	<b>Total</b>	<b>83</b>

<b>PLANTA 29. RECUPERACION DE VAPORES</b>			
<b>Fuente que la abastece</b>	<b>(gpm)</b>	<b>Plantas a las que abastece</b>	<b>(gpm)</b>
Suavización	21,12	Agua residual	53,00
Generación Vapor	4,93	X	X
Aguas agrías	19,41	X	X
Generación de H <sub>2</sub>	7,54	X	X
<b>Total</b>	<b>53</b>	<b>Total</b>	<b>53</b>

## 11. ANALISIS DE RESULTADOS

### 11.1 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EN FUNCION DE LOS COSTOS DE AGUA

#### 11.1.1 Reducción en el consumo de agua clarificada y suavizada

Como resultado de la optimización tenemos una reducción del 20% en la producción de agua clarificada y del 58% en la producción de agua suavizada.

**Tabla 12.** Consumo de agua industrial y producción residual después de la optimización en función de los costos de agua.

Planta	Calidad del agua	Consumo normal (gpm)	Consumo después de optimizar	Agua residual (gpm)	Agua residual después de optimizar
Clarificación	Magdalena	6310,5	5065,67	0	0
Suavización	Clarificada	597	345,5	0	0
Desmineralización	Clarificada	1700	1700	0	0
Generación de vapor	Desmineraliz.	1500	1500	265	0
TE - 831	Clarificada	650	550,42	148	42,36
TE - 890	Clarificada	1192	984,92	222	156,81
TE - 2945	Clarificada	1342	1130,23	75	70
Topping 150	Clarificada	29	0	28	27,5
Condensado				38,6	0
Topping 200	Clarificada	36	0	35	34,77
Condensado				28,4	0
Topping 250	Clarificada	35	0	36	36
Condensado				18,9	0
Topping 2000	Clarificada	5,2	0	5	5
Condensado				17,8	0
Topping 2100	Clarificada	14,6	0	14	13,69
Condensado				14,7	0
Tratamientos con H <sub>2</sub>	Suavizada	10	4,15	10	9,95

Planta de ácido	Clarificada	217,1	0	216,1	168,28
Crac. mod. IV D-350	Suavizada	94,2	93	59,3	58,95
Crac. mod. IV D-339	Clarificada	50,82	0	42,82	0
Crac. orthoflow T-501	Suavizada	100	73,09	164	30,40
Crac. orthoflow E-567	Suavizada	50	19,60	50	0
Crac. UOP-1 E-2700	Suavizada	177	65,65	113	112
Aguas agrias	agria	360	201,6	360	0
Trat parafinic con H <sub>2</sub>	Suavizada	10	3,74	10	0
Trat naftenic con H <sub>2</sub>	Suavizada	10	3,38	10	0
Generac de H <sub>2</sub>	Suavizada	32	28,46	82	0
Recuperac. vapores	Suavizada	54	19,88	54	0

### 11.1.2 Factibilidad de la reutilización

La reducción en el consumo de agua industrial se debe, en gran medida, a la total reutilización de las purgas de calderas. Se reutilizan en un 90% como reemplazo de agua clarificada en la planta de ácido, en un 5% como agua de lavado de gases y en un 5% como agua de enfriamiento de bombas; estas opciones son completamente viables.

El 50% de las purgas de las torres de enfriamiento se reutiliza directamente, un 10% se reutiliza después de una regeneración en la remoción de hidrocarburos y el restante 40% se envía a aguas residuales. Estas purgas se reutilizan de la siguiente manera:

- Como agua de desalado de crudo, en donde reemplazan totalmente el agua clarificada.
- Como agua de enfriamiento de bombas, junto con un 75% de agua de purga de calderas, 10% de recirculación interna, 10% de agua proveniente de remoción de hidrocarburos y 5% de agua agria despojada.
- En la planta de ácido se mezcla con un 90% de agua de purga de caldera, además un porcentaje pequeño de otras aguas.

- Alrededor de un 10% se envía a remoción de hidrocarburos donde se vuelve a utilizar en la planta de ácido y enfriamiento de bombas.

Las cuatro opciones son totalmente viables.

Las aguas de reposición en las torres de enfriamiento son una mezcla de un 84% de agua clarificada con condensados de topping y aguas agrias despojadas. Esta opción es completamente factible debido a la amplia variedad de calidad de agua que pueden recibir las torres. Esta opción ya ha sido estudiada por el ICP<sup>[4]</sup>.

Las aguas agrias despojadas tienen una total reutilización, principalmente como reposición en torres de enfriamiento y reemplazando alrededor de un 30% del agua suavizada empleada en el lavado de gases. Esta opción es factible debido a la baja concentración de sólidos y oxígeno en estas aguas<sup>[5]</sup>.

El agua de desalado reemplaza alrededor de 0,2% del agua clarificada utilizada en la planta de ácido; esta opción no es económicamente viable. Este resultado se da debido a que el modelo busca minimizar el consumo de agua únicamente en función de su costo y por ser un porcentaje tan pequeño, la concentración de contaminantes alcanza a cumplir con las restricciones.

Hay una reducción del 57% del consumo de agua suavizada para lavado de gases debido, principalmente, a la reutilización de las aguas agrias despojadas y a la reutilización directa de aguas agrias entre procesos que requieren lavado de gases. En menor medida, se debe a la reutilización del agua de purga de calderas. Al analizar esta opción se determinó que es

factible debido a que la reutilización de aguas agrias despojadas para lavado de gases es un esquema comúnmente usado por las refinerías de Shell<sup>[5]</sup>.

Hay una disminución de un 56% de la cantidad de agua agría que se trata en la planta despojadora de aguas agrias.

## 11.2 ANÁLISIS DE LA OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y TRANSPORTE

### 11.2.1 Reducción en el consumo de agua clarificada y suavizada

Como resultado de la optimización tenemos, igualmente, una reducción del 20% en la producción de agua clarificada y del 57% en la producción de agua suavizada; sin embargo, tenemos un incremento en el consumo total de agua cruda

**Tabla 13.** Consumo de agua industrial y producción residual después de la optimización en función de los costos de agua y transporte.

Planta	Calidad del agua	Consumo normal (gpm)	Consumo después de optimizar	Agua residual (gpm)	Agua residual después de optimizar
Clarificación	Magdalena	6310,5	5089,48	0	0
Suavización	Clarificada	597	343	0	0
Desmineralización	Clarificada	1700	1700	0	0
Generación de vapor	Desmineraliz.	1500	1500	265	0
TE - 831	Clarificada	650	541,18	148	0
TE - 890	Clarificada	1192	982,77	220	220
TE - 2945	Clarificada	1342	1166,29	70	70
Topping 150	Clarificada	29	0	28	28
Condensado				38,6	0
Topping 200	Clarificada	36	0	35	35

Condensado				28,4	0
Topping 250	Clarificada	35	0	36	36
Condensado				18,9	0
Topping 2000	Clarificada	5,2	0	5	5
Condensado				17,8	0
Topping 2100	Clarificada	14,6	0	14	14
Condensado				14,7	10,78
Tratamientos con H <sub>2</sub>	Suavizada	10	4,15	10	10
Planta de ácido	Clarificada	217,1	0	216,1	155,81
Crac. mod. IV D-350	Suavizada	94,2	93	59,3	59
Crac. mod. IV D-339	Clarificada	50,82	0	42,82	29,04
Crac. orthoflow T-501	Suavizada	100	70,82	164	9,22
Crac. orthoflow E-567	Suavizada	50	18,01	50	0
Crac. UOP-1 E-2700	Suavizada	177	65,65	113	112
Aguas agrias	Agria	360	158,44	360	0
Trat parafinic con H <sub>2</sub>	Suavizada	10	3,74	10	9
Trat naftenic con H <sub>2</sub>	Suavizada	10	3,74	10	9
Generac de H <sub>2</sub>	Suavizada	32	28,46	82	0
Recuperac. vapores	Suavizada	54	21,12	53	53

Tenemos un aumento del 13% en la producción de agua residual respecto de la optimización de función de los costos de agua.

### 11.2.2 Factibilidad de la reutilización

En los resultados podemos observar que, en las plantas de petroquímica y cracking UOP-1, lo económicamente factible es no reutilizar las aguas residuales sino enviarlas directamente a la PTAR. Lo mismo ocurre con las torres de enfriamiento 890/850 y 2945. Esto se debe a que estas plantas se localizan en lugares apartados de la refinería. En este caso deberían considerarse los beneficios ambientales por encima de los beneficios económicos para reutilizar estas aguas.

Debido a la localización apartada de la PTAR no se reutiliza agua regenerada por remoción de hidrocarburos.

El agua de reposición en torres de enfriamiento es una mezcla de 84% de agua clarificada junto con agua cruda, condensados de topping, efluentes de la planta de ácido y agua agria despojada. Al igual que en la optimización anterior, es una opción viable.

Hay una total reutilización de las aguas agrias despojadas en un 48% como agua de reposición de torres de enfriamiento y en un 28% como agua de lavado de gases. Estas opciones son factibles<sup>[5]</sup>.

Encontramos una recirculación del 18% del agua de enfriamiento de bombas, un 80% corresponde a agua de purgas de calderas y un 2% de agua cruda. La recirculación del agua de enfriamiento de bombas ha sido recomendada en varios trabajos realizados en la GCB<sup>[6]</sup>.

Los efluentes de la planta de generación de hidrógeno se reutilizan como agua de lavado de gases de cracking, esta es una opción físico-químicamente factible que se emplea comúnmente en las refinerías de Shell<sup>[5]</sup>.

## 12. BALANCE ECONÓMICO DE LOS RESULTADOS

### 12.1 OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA

Para el cálculo del ahorro anual, se realizó la siguiente tabla donde se calculan los costos actuales por consumo de agua industrial y producción de agua residual. Los costos son únicamente el valor del agua en la GCB con corte a enero del 2003.

**Tabla 14.** Costo del agua utilizada actualmente en la GCB

Planta	entrada	\$/gpm	costo	salida	\$/gpm	costo
Clarificación	6310,5	0,652	4114,446		0	0
Suavización	597	1,482	884,754		0	0
Desmineralización	1700	1,482	2519,4		0	0
Generación de vapor	1500	6,16	9240	265	0,09361	24,80665
TE - 831	650	1,482	963,3	148	0,09361	13,85428
TE - 890/850	1192	1,482	1766,544	222	0,09361	20,78142
TE - 2945	1342	1,482	1988,844	75	0,09361	7,02075
Topping 150	29	1,482	42,978	29	0,09361	2,71469
Condensado			0	38,6	0,09361	3,613346
Topping 200	36	1,482	53,352	36	0,09361	3,36996
Condensado			0	28,4	0,09361	2,658524
Topping 250	35	1,482	51,87	35	0,09361	3,27635
Condensado			0	18,9	0,09361	1,769229
Topping 2000	5,2	1,482	7,7064	5,2	0,09361	0,486772
Condensado			0	17,8	0,09361	1,666258
Topping 2100	14,6	1,482	21,6372	14,6	0,09361	1,366706
Condensado			0	14,7	0,09361	1,376067

<b>Tratamientos con H<sub>2</sub></b>	10	6,16	61,6	10	0,09361	0,9361
<b>Planta de ácido</b>	217,1	1,482	321,7422	216,1	0,09361	20,229121
<b>Crac. mod. IV D-350</b>	94,2	6,16	580,272	59,3	0,09361	5,551073
<b>Crac. mod. IV D-339</b>	50,82	1,482	75,315	42,82	0,09361	4,0083802
<b>Cra. orthoflow T-501</b>	100	6,16	616	164	0,09361	15,35204
<b>Cra. orthoflow E-567</b>	50	6,16	308	50	0,09361	4,6805
<b>Crac. UOP-1 E-2700</b>	177	6,16	1090,32	113	0,09361	10,57793
<b>Aguas agrias</b>	360	0,09361	33,6996	360	0,09361	33,6996
<b>Trat parafinic con H<sub>2</sub></b>	10	6,16	61,6	10	0,09361	0,9361
<b>Trat naftenic con H<sub>2</sub></b>	10	6,16	61,6	10	0,09361	0,9361
<b>Generac de H<sub>2</sub></b>	32	6,16	197,12	82	0,09361	7,67602
<b>Recuperac. vapores</b>	54	6,16	332,64	54	0,09361	5,05494
		0,09361	0		0,09361	0
		<b>total</b>	25394,7406		<b>total</b>	198,398906

El costo total actual es \$ 25593,13955 / min

El valor de la función objetivo o costo óptimo es \$ 19058,25274 / min

Ahorro \$ 6534,882308 / min

Anualmente el ahorro es de **\$ 3 434'734 141**

Por concepto de disminución en el consumo de agua industrial y producción de agua residual

## 12.2 OPTIMIZACIÓN EN FUNCIÓN DE LOS COSTOS DE AGUA Y TRANSPORTE

En la siguiente tabla se calculan los costos actuales por consumo de agua industrial y producción de agua residual. El valor del gpm está dado por la suma del costo del agua en la GCB y el costo del transporte hasta el lugar de consumo con corte a enero del 2003.

**Tabla 15.** Costo del agua utilizada actualmente en la GCB incluyendo costos de transporte

Planta	entrada	\$/gpm	costo	salida	\$/gpm	costo
Clarificación	6310,5	0,6716	4238,1318	5755	0	0
Suavización	597	1,5277	912,0369	1260	0	0
Desmineralización	1700	1,5277	2597,09	1500	0	0
Generación de vapor	1500	6,2115	9317,25	265	0,1050	27,82765
TE - 831	650	1,5277	993,019646	148	0,1204	17,8192
TE - 890	1192	1,5277	1821,04526	222	0,1131	25,1082
TE - 2945	1342	1,5277	2050,20364	75	0,1500	11,25
Topping 150	29	1,5277	44,3039534	29	0,1013	2,9377
Condensado			0	38,6	0,1111	4,28846
Topping 200	36	1,5277	54,9980111	36	0,1679	6,0444
Condensado			0	28,4	0,1472	4,18048
Topping 250	35	1,5277	53,4702886	35	0,1697	5,9395
Condensado			0	18,9	0,1766	3,33774
Topping 2000	5,2	1,5277	7,94415717	5,2	0,1545	0,8034
Condensado			0	17,8	0,1186	2,11108
Topping 2100	14,6	1,5277	22,304749	14,6	0,1511	2,20606
Condensado			0	14,7	0,1518	2,23146
Tratamientos con H <sub>2</sub>	10	6,19503	61,9503439	10	0,1151	1,151
Planta de ácido	217,1	1,5277	331,668562	216,1	0,1068	23,07948
Cra. mod. IV D-350	94,2	6,19503	583,57224	59,3	0,1203	7,13379
Cra. mod. IV D-339	50,82	1,5277	77,6388591	42,82	0,1112	4,761584
Cra. orthoflow T-501	100	6,19503	619,503439	164	0,1076	17,6464
Cra. orthoflow E-567	50	6,19503	309,75172	50	0,1236	6,18
Cra. UOP-1 E-2700	177	6,19503	1096,52109	113	0,1077	12,1701
Aguas agrias	360	0,11361	40,8996	360	0,1016	36,576
Trat parafinico con H <sub>2</sub>	10	6,19503	61,9503439	10	0,1317	1,317
Trat naftenico con H <sub>2</sub>	10	6,19503	61,9503439	10	0,1238	1,238
Generac de H <sub>2</sub>	32	6,19503	198,241101	82	0,1481	12,1442
Recuperac. vapores	54	6,19503	334,531857	54	0,1146	6,1884
		<b>total</b>	25918,7779		<b>total</b>	245,6713

El costo total actual es \$ 26164,44918 / min

El valor de la función objetivo o costo óptimo es \$ 20777,8373 / min

Ahorro \$ 5386,6118 / min

Anualmente el ahorro es de **\$ 2 831'203 204**

Por concepto de disminución en el consumo de agua industrial, en la producción de agua residual y costos de transporte.

La inversión en equipos para transporte de agua corresponde a un aproximado de **\$ 4 861'120 901** que se financian a cinco años a una tasa de 26% E.A. Para estimar el tiempo necesario para pagar la deuda se realizó el siguiente plan de pagos.

**Tabla 16.** Plan de pagos de la inversión en equipos para transporte de agua

<b>Plan de pagos de la deuda</b>				
	<b>Intereses</b>	<b>Pago</b>	<b>Amortización</b>	<b>Saldo</b>
año 0				\$ 4 861'120 901
año 1	\$ 1 263'891 434	\$ 2 831'203 204	\$ 1 567'311 770	\$ 3 293'809 131
año 2	\$ 856'390 374	\$ 2 831'203 204	\$ 1 974'812 830	\$ 1 318'996 301
año 3	\$ 342'939 038	\$ 2 831'203 204	\$ 2 488'264 166	\$ 0

En este plan de pagos vemos que si los beneficios obtenidos; por concepto de disminución en el consumo de agua industrial, en la producción de agua residual y costos de transporte; se emplearan únicamente como servicio de pago de la deuda; la inversión se puede recuperar al cabo de 2,4 años

## **13. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN**

Este modelo de optimización ha sido desarrollado para trabajar en Microsoft Excel con macros de Visual Basic para la entrada de datos; para su funcionamiento se requiere del paquete Premium Solver Platform (PSP)<sup>\*</sup> y del paquete Large-Scale LP solver engine (LSLP)<sup>\*</sup>.

### **13.1 INGRESO DE DATOS**

Al abrir la hoja de cálculo se encuentra una pantalla interactiva donde se pueden observar todas las plantas, las concentraciones de los contaminantes y el volumen de agua con el que trabajan. Por defecto, se encuentran los valores empleados para desarrollar este trabajo, sin embargo, pueden ser ingresados nuevos valores y el modelo trabajará con éstos.

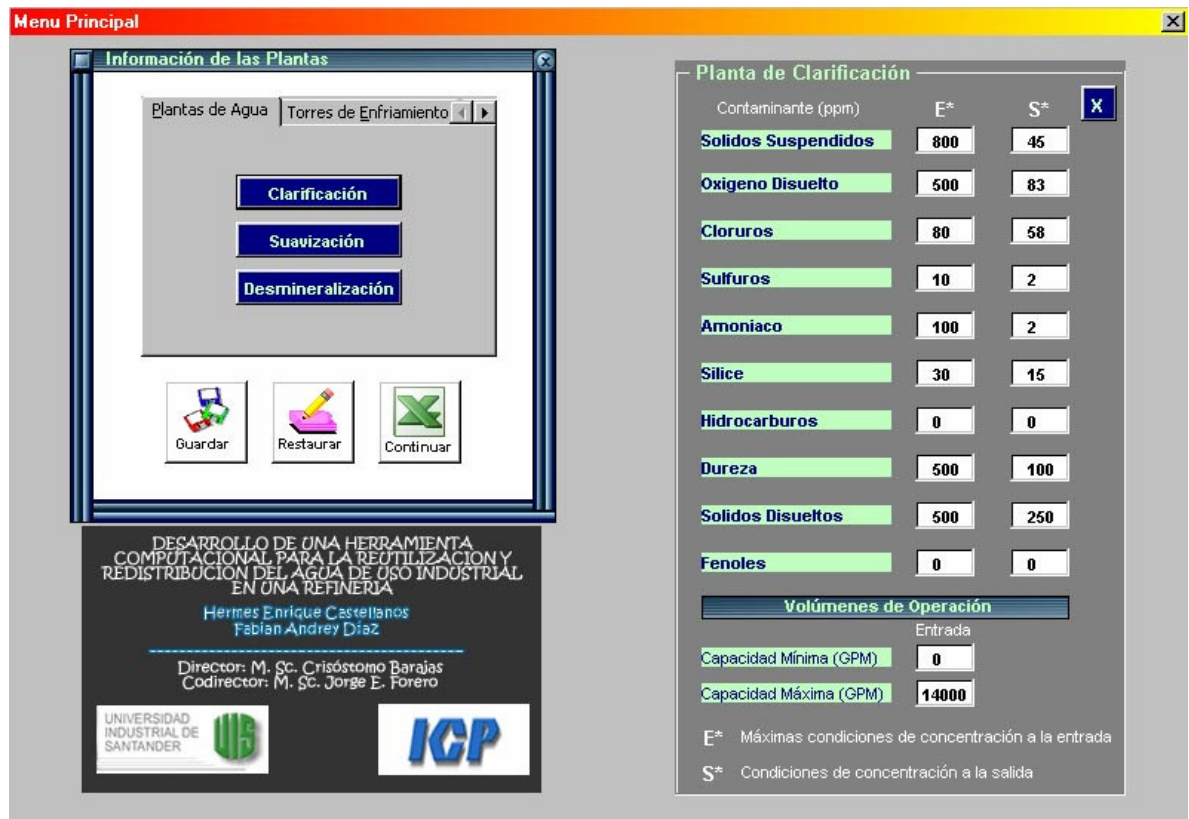
Para ingresar nuevos valores simplemente se digitan en las casillas correspondientes, pueden utilizarse comas o puntos, y se presiona la casilla guardar; luego puede continuar con la optimización. Sin embargo, los nuevos datos no se guardarán y al abrir el programa nuevamente, aparecerán los datos asignados por defecto.

Si se ingresan letras u otros caracteres, se indicará que han sido ingresados datos incorrectos. Al presionar la casilla restaurar, aparecerán nuevamente los valores utilizados para el desarrollo de este trabajo.

---

<sup>\*</sup> Ver anexo 4.

**Figura 5.** Panel de ingreso de datos de la herramienta computacional



## 13.2 EJECUCIÓN DE LA HERRAMIENTA

La herramienta se ejecuta en la hoja de cálculo con el nombre 'datos'. En el menú de solver se encuentran 5 motores de optimización. Se recomienda emplear el Large-Scale solver engine, debido a la gran cantidad de variables y restricciones que maneja el modelo.

Al resolver el modelo aparece en la pantalla otro menú donde se puede elegir si se quiere presentar los reportes de respuestas, sensibilidad y límites. Se recomienda no elegir el reporte de límites ya que para esto se requiere de un ordenador de alta velocidad. Se puede continuar simplemente sin escoger

ningún reporte y en la hoja de cálculo con el nombre respuestas, aparecen los resultados de forma ordenada.

Si se selecciona algún reporte, este se debe eliminar para poder usar nuevamente la herramienta.

Este modelo de optimización ha sido diseñado para trabajar con 30 plantas y 10 contaminantes diferentes e independientes, sin embargo, puede trabajar con un número menor de plantas o contaminantes.

## CONCLUSIONES

- La GCB genera cerca de 4000 GPM de aguas residuales, las cuales se envían a la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR, sin embargo, existe un gran número de efluentes que podrían ser reutilizados debido a que cumplen con los parámetros de calidad del agua requerida en otros procesos.
- Es claro que el éxito en la disminución en el consumo de agua industrial y en el tratamiento de aguas residuales en la GCB, radica en la correcta reutilización de los efluentes y redistribución de las corrientes de aguas industriales.
- Como resultado de este trabajo, se considera que es posible reducir hasta en un 64% el volumen de agua residual que, en las plantas seleccionadas, se envía a la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR.
- Como resultado de la optimización, se presenta la posibilidad de reducir en un 80% la producción de agua clarificada y en un 58% la producción de agua suavizada empleada en las plantas que fueron seleccionadas para este trabajo.
- El análisis de resultados ha determinado la factibilidad de las reutilizaciones y redistribuciones obtenidas en la optimización en función de los costos de agua y en la optimización en función de los costos de agua y transporte.

- La reutilización de efluentes y redistribución de corrientes de aguas industriales que se plantea en este trabajo como resultado de la optimización en función de los costos de agua, representaría un ahorro anual de \$ 3 434'734 141 pesos, por concepto de disminución en el consumo de agua industrial y producción de agua residual.
- La reutilización de efluentes y redistribución de corrientes de aguas industriales que se plantea en este trabajo como resultado de la optimización en función de los costos de agua y transporte, representaría un ahorro anual de \$ 2 831'203 204, para recuperar la inversión realizada en equipos para el transporte de agua al cabo de 2,4 años.
- Además del beneficio económico que representa la disminución en el consumo de agua industrial y en la producción de aguas residuales en la GCB; es incalculable el beneficio ecológico para la laguna San Silvestre y el río Magdalena. Tales medidas representarían la integración de la refinería con la sociedad, en la cual la preservación de los recursos naturales, como el agua, se define como una de las mejores contribuciones de lo que debería ser nuestro objetivo, el desarrollo sostenible.
- Mediante este estudio fundamentado, se plantea la posibilidad de profundizar en la caracterización de los efluentes de cada una de las plantas que integran la refinería con el objeto de diseñar futuros y posibles esquemas en la reutilización de efluentes y redistribución de corrientes de aguas industriales, maximizando los resultados mencionados en este trabajo.

## RECOMENDACIONES

- Como resultado del desarrollo de este trabajo, se recomienda restituir totalmente el agua empleada en el desalado de crudo por agua de purga de torres de enfriamiento.
- Se plantea la posibilidad de disminuir hasta en un 16% el volumen de agua clarificada empleada como reposición en torres de enfriamiento mediante la reutilización de los condensados de topping y del agua agria despojada.
- Es posible reutilizar totalmente el agua de purgas de calderas, en un 90% como reemplazo del agua clarificada utilizada en la planta de ácido, y en el 10% restante, como parte del agua empleada para lavado de gases.
- Se plantea la posibilidad de reutilizar totalmente las aguas agrias despojadas, en un 50% como parte del agua de reposición de torres de enfriamiento, en un 30% como parte del agua de lavado de gases y en el restante 20%, como parte del agua empleada en procesos como el desalado de crudo y enfriamiento de bombas.
- Como resultado de la optimización, se presenta la posibilidad de restituir el agua empleada para enfriamiento de bombas, con un 75% de agua de purga de calderas, 10% de recirculación interna, 10% de agua proveniente de remoción de hidrocarburos y 5% de agua agria despojada.

- Es posible obtener una reducción hasta del 57% del consumo de agua suavizada utilizada para lavado de gases debido, principalmente, a la reutilización de las aguas agrias despojadas y a la reutilización directa de aguas agrias entre procesos que requieren lavado de gases.

## LISTA DE REFERENCIAS

- [1] **Díaz María Piedad, Castro Jesús Alberto.** 2002. Evaluación e identificación de efluentes en la GRC.
- [2] **Díaz María Piedad, Escobar Martín.** 2001. Evaluación del potencial de reuso de agua en la unidad de servicios industriales de la GRC. Informe técnico 13060-W91403-06-06. ECOPETROL – ICP. 86pp
- [3] **Peter y Timmerhaus.** Plant Design and Economics for Chemical Engineers, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1991
- [4] **Díaz, M. P., Ardila, M. V., Dugarte, F. & Moreno, N.** (2001). Reuso y tratamiento de aguas residuales-Fase 1, pp. 89. ECOPETROL-ICP, Bucaramanga.
- [5] **Díaz María Piedad.** 2002. División de tecnologías complementarias. Mapa de aguas de la GCB.
- [6] **Núñez, A.** (2002a). Optimización del uso del agua en la U-150 de la GCB. ECOPETROL-ICP, Barrancabermeja.

## BIBLIOGRAFIA

**AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.** Manual de aguas para usos industriales, Volumen 3. Ediciones ciencia y técnica, S.A 1988

**AZAD S. Hardam.** Industrial Wastewater Management Handbook. McGraw-Hill. 1976

**BERNÉ Francois, CORDONNIER Jean.** Industrial water treatment, refining, petrochemicals and gas processing techniques. Editions technip. 1995.

**HIGUITA Rolando.** Gestión ambiental durante el mantenimiento con parada de planta de las unidades de alquilación y ácido de la refinería de Barrancabermeja. Tesis de grado. Universidad Industrial de Santander, 1999.

**J. N. Tanis.** Procedures of industrial water treatment. Ltan Inc. Ridgefield Connecticut. 1987

**MANN G. James, LIU Y. A.** Industrial water reuse and wastewater minimization. McGraw-Hill. 1999.

**SIMS, J. J. & PUCKORIUS, P.** A practical guide to water recycle-reuse. *Nace International Corrosion* 1997, 484/1 - 484/12.

**You, S.-H., Tseng, D.-H., Guo, G.-L. & Yang, J.-J.** The potential for the recovery and reuse of cooling water in Taiwan. *Resources, Conservation and Recycling* 1999, 26, 53-70

## ANEXOS

### ANEXO 1. Datos empleados en el modelo computacional de optimización

Planta 1 Clarificación			Planta 2 Suavización			Planta 3 Desmineralización		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	800	45	S. suspendidos	50	3	S. suspendidos	50	0,03
S. disueltos	500	250	S. disueltos	250	10	S. disueltos	250	0,5
O <sub>2</sub> disuelto	500	83	O <sub>2</sub> disuelto	200	2	O <sub>2</sub> disuelto	200	0,6
Cloruros	80	58	Cloruros	60	5	Cloruros	60	0,5
Sulfuros	10	2	Sulfuros	10	2	Sulfuros	10	2
Amoniaco	100	2	Amoniaco	10	2	Amoniaco	10	2
Sílice	30	15	Sílice	30	2,5	Sílice	30	0,1
Hidrocarburos	0	0	Hidrocarburos	0	0	Hidrocarburos	0	0
Dureza	500	100	Dureza	200	10	Dureza	200	0,1
Fenoles	0	0	Fenoles	0	0	Fenoles	0	0
menor	0	1	menor	0	1	menor	0	1
mayor	14000	1	mayor	1900	1	mayor	1700	1
Planta 4 Generac vapor			Planta 5 TE - 831			Planta 6 TE – 890/850		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	0,03	40	S. suspendidos	50	74	S. suspendidos	50	75
S. disueltos	0,5	155	S. disueltos	250	500	S. disueltos	250	500
O <sub>2</sub> disuelto	0,6	2	O <sub>2</sub> disuelto	90	83	O <sub>2</sub> disuelto	90	83
Cloruros	0,5	56	Cloruros	60	133	Cloruros	60	145
Sulfuros	2	10	Sulfuros	20	20	Sulfuros	20	20
Amoniaco	2	2	Amoniaco	10	6	Amoniaco	10	6
Sílice	0,1	30	Sílice	15	51	Sílice	15	55
Hidrocarburos	0,1	0,001	Hidrocarburos	10	275	Hidrocarburos	10	236
Dureza	0,1	65	Dureza	100	495	Dureza	100	491
Fenoles	0,1	0,001	Fenoles	10	17	Fenoles	10	15
menor	1500	260	menor	600	130	menor	1100	220
mayor	1600	270	mayor	700	150	mayor	1220	230

Planta 7 TE - 2945			Planta 8 Desalador Top 150			Planta 9 Cond. Top 150		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	50	74	S. suspendidos	90	60	S. suspendidos	0	10
S. disueltos	250	500	S. disueltos	500	300	S. disueltos	0	23
O <sub>2</sub> disuelto	90	83	O <sub>2</sub> disuelto	90	83	O <sub>2</sub> disuelto	0	12
Cloruros	60	139	Cloruros	150	5000	Cloruros	0	100
Sulfuros	20	21	Sulfuros	110	100	Sulfuros	0	100
Amoniaco	10	7	Amoniaco	60	60	Amoniaco	0	60
Sílice	15	54	Sílice	60	17	Sílice	0	5
Hidrocarburos	10	245	Hidrocarburos	300	300	Hidrocarburos	0	60
Dureza	100	490	Dureza	500	500	Dureza	0	15
Fenoles	10	19	Fenoles	300	30	Fenoles	0	30
menor	1300	70	menor	28	28	menor	0	38
mayor	1400	80	mayor	30	30	mayor	0	39
Planta 10 Desalador Top 200			Planta 11 Cond. Top 200			Planta 12 Desalador Top 250		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	90	60	S. suspendidos	0	10	S. suspendidos	90	60
S. disueltos	500	300	S. disueltos	0	23	S. disueltos	500	300
O <sub>2</sub> disuelto	90	83	O <sub>2</sub> disuelto	0	12	O <sub>2</sub> disuelto	90	83
Cloruros	150	5000	Cloruros	0	100	Cloruros	150	5000
Sulfuros	110	100	Sulfuros	0	100	Sulfuros	100	100
Amoniaco	60	60	Amoniaco	0	60	Amoniaco	60	60
Sílice	60	16	Sílice	0	5	Sílice	60	16
Hidrocarburos	300	310	Hidrocarburos	0	60	Hidrocarburos	300	330
Dureza	500	500	Dureza	0	15	Dureza	500	500
Fenoles	300	30	Fenoles	0	30	Fenoles	300	30
menor	35	35	menor	0	28	menor	36	36
mayor	37	37	mayor	0	29	mayor	37	37

Planta 13 Cond. Top 250			Planta 14 Desal. Top 2000			Planta 15 Cond. Top 2000		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	0	10	S. suspendidos	90	60	S. suspendidos	0	10
S. disueltos	0	23	S. disueltos	500	300	S. disueltos	0	23
O <sub>2</sub> disuelto	0	12	O <sub>2</sub> disuelto	90	83	O <sub>2</sub> disuelto	0	12
Cloruros	0	100	Cloruros	150	5000	Cloruros	0	100
Sulfuros	0	100	Sulfuros	100	100	Sulfuros	0	100
Amoniaco	0	60	Amoniaco	60	60	Amoniaco	0	60
Sílice	0	5	Sílice	60	15	Sílice	0	5
Hidrocarburos	0	60	Hidrocarburos	300	320	Hidrocarburos	0	60
Dureza	0	15	Dureza	500	500	Dureza	0	15
Fenoles	0	30	Fenoles	300	30	Fenoles	0	30
menor	0	18	menor	5	5	menor	0	17
mayor	0	19,5	mayor	6	6	mayor	0	19
Planta 16 Desal. Top 2100			Planta 17 Cond. Top 2100			Planta 18 Tratam. con H2		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	90	60	S. suspendidos	0	10	S. suspendidos	10	10
S. disueltos	500	300	S. disueltos	0	23	S. disueltos	60	20
O <sub>2</sub> disuelto	90	83	O <sub>2</sub> disuelto	0	12	O <sub>2</sub> disuelto	60	50
Cloruros	150	5000	Cloruros	0	100	Cloruros	50	30
Sulfuros	100	100	Sulfuros	0	100	Sulfuros	50	1550
Amoniaco	60	60	Amoniaco	0	60	Amoniaco	50	900
Sílice	60	15	Sílice	0	5	Sílice	30	15
Hidrocarburos	300	330	Hidrocarburos	0	60	Hidrocarburos	20	60
Dureza	500	500	Dureza	0	15	Dureza	50	43
Fenoles	300	30	Fenoles	0	30	Fenoles	50	20
Menor	14	14	menor	0	16	menor	10	10
Mayor	15	15	mayor	0	17	mayor	11	11

Planta 19 Planta de ácido			Planta 20 Crack mod. IV D-350			Planta 21 Crack mod IV D-339		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	60	65	S. suspendidos	10	10	S. suspendidos	60	10
S. disueltos	300	510	S. disueltos	20	20	S. disueltos	550	482
O <sub>2</sub> disuelto	83	60	O <sub>2</sub> disuelto	20	50	O <sub>2</sub> disuelto	83	83
Cloruros	83	90	Cloruros	10	50	Cloruros	83	83
Sulfuros	20	650	Sulfuros	2	3000	Sulfuros	20	20
Amoniaco	10	213	Amoniaco	2	3000	Amoniaco	20	8
Sílice	30	15	Sílice	2,5	18	Sílice	30	20
Hidrocarburos	10	10	Hidrocarburos	10	60	Hidrocarburos	60	120
Dureza	200	350	Dureza	10	30	Dureza	300	300
Fenoles	10	5	Fenoles	10	300	Fenoles	50	13
menor	216	216	menor	93	59	menor	50	42
mayor	218	218	mayor	94	60	mayor	52	43
Planta 22 Crack Orthof T-501			Planta 23 Crack Orthof E-567			Planta 24 Crack UOP1 E-2700		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	10	10	S. suspendidos	10	10	S. suspendidos	10	10
S. disueltos	20	20	S. disueltos	60	20	S. disueltos	60	20
O <sub>2</sub> disuelto	52	50	O <sub>2</sub> disuelto	60	40	O <sub>2</sub> disuelto	60	50
Cloruros	20	50	Cloruros	50	40	Cloruros	50	50
Sulfuros	20	3000	Sulfuros	50	35	Sulfuros	50	3000
Amoniaco	20	3000	Amoniaco	50	45	Amoniaco	50	3000
Sílice	30	17	Sílice	30	18	Sílice	30	19
Hidrocarburos	10	60	Hidrocarburos	20	50	Hidrocarburos	20	60
Dureza	43	30	Dureza	50	40	Dureza	50	30
Fenoles	10	300	Fenoles	50	10	Fenoles	50	300
menor	95	163	menor	48	48	menor	175	112
mayor	105	165	mayor	52	52	mayor	180	114

Planta 25 Aguas agrias			Planta 26 Trat parafin con H2			Planta 27 Trat naften con H2		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	60	10	S. suspendidos	10	10	S. suspendidos	10	10
S. disueltos	20	65	S. disueltos	60	20	S. disueltos	60	20
O <sub>2</sub> disuelto	60	25	O <sub>2</sub> disuelto	60	50	O <sub>2</sub> disuelto	60	48
Cloruros	100	45	Cloruros	50	90	Cloruros	50	90
Sulfuros	4000	91	Sulfuros	50	1500	Sulfuros	50	1480
Amoniaco	4000	81	Amoniaco	50	900	Amoniaco	50	800
Sílice	50	25	Sílice	30	17	Sílice	30	18
Hidrocarburos	90	41	Hidrocarburos	20	80	Hidrocarburos	20	80
Dureza	50	61	Dureza	50	43	Dureza	50	43
Fenoles	300	50	Fenoles	50	15	Fenoles	50	15
menor	0	1	Menor	9	9	menor	9	9
mayor	370	1	Mayor	11	11	mayor	11	11
Planta 28 Generac de H2			Planta 29 Rec. Vapores UOP1			Planta 30 Remoción HC		
Condiciones			Condiciones			Condiciones		
(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida	(ppm)	Entrada	Salida
S. suspendidos	9	10	S. suspendidos	10	10	S. suspendidos	200	100
S. disueltos	20	62	S. disueltos	60	20	S. disueltos	600	500
O <sub>2</sub> disuelto	52	15	O <sub>2</sub> disuelto	60	50	O <sub>2</sub> disuelto	600	83
Cloruros	12	65	Cloruros	50	10	Cloruros	200	200
Sulfuros	3	65	Sulfuros	50	960	Sulfuros	60	60
Amoniaco	8	85	Amoniaco	50	850	Amoniaco	60	60
Sílice	30	26	Sílice	30	15	Sílice	200	21
Hidrocarburos	10	35	Hidrocarburos	20	87	Hidrocarburos	5000	25
Dureza	43	84	Dureza	50	43	Dureza	500	390
Fenoles	10	15	Fenoles	50	18	Fenoles	5000	10
menor	31	81	Menor	53	53	menor	0	X
mayor	33	83	Mayor	55	55	mayor	2000	X

Agua calidad Magdalena					
Condiciones		Condiciones		Condiciones	
(ppm)	Entrada	(ppm)	Entrada	(ppm)	Entrada
S. suspendidos	650	Cloruros	63	Sílice	20
S. disueltos	370	Sulfuros	2	Hidrocarburos	0
O <sub>2</sub> disuelto	250	Amoniaco	2	Dureza	163
Fenoles	0				

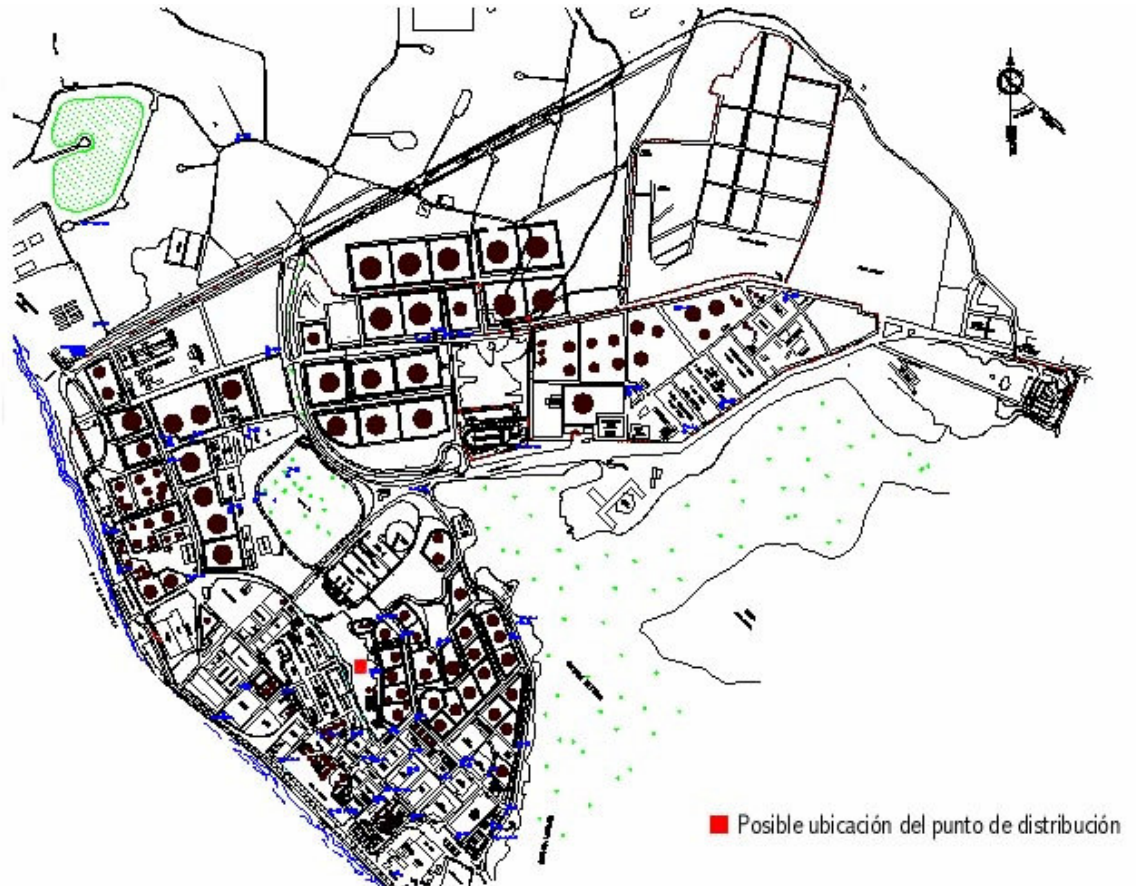
## ANEXO 2. Cálculo de los costos de transporte de agua

<b>Costos de bombeo</b>			
<b>Planta</b>	<b>\$/galón</b>	<b>agua residual</b>	<b>agua fresca</b>
1. Clarificación	\$ 0,0457	\$ 0,1393	\$ 0,6977
2. Suavización	\$ 0,0350	\$ 0,1286	\$ 0,6870
3. Desmineralización	\$ 0,0515	\$ 0,1451	\$ 0,7035
4. Generac vapor	\$ 0,0114	\$ 0,1050	\$ 0,6634
5. TE - 831	\$ 0,0268	\$ 0,1204	\$ 0,6788
6. TE - 890/845	\$ 0,0195	\$ 0,1131	\$ 0,6715
7. TE - 2945	\$ 0,0564	\$ 0,1500	\$ 0,7084
8. Topping 150	\$ 0,0077	\$ 0,1013	\$ 0,6597
9. Condensado Top 150	\$ 0,0175	\$ 0,1111	\$ 0,6695
10. Topping 200	\$ 0,0743	\$ 0,1679	\$ 0,7263
11. Condensado Top 200	\$ 0,0536	\$ 0,1472	\$ 0,7056
12. Topping 250	\$ 0,0761	\$ 0,1697	\$ 0,7281
13. Condensado Top 250	\$ 0,0830	\$ 0,1766	\$ 0,7350
14. Topping 2000	\$ 0,0609	\$ 0,1545	\$ 0,7129
15. Condensado Top 2000	\$ 0,0249	\$ 0,1186	\$ 0,6769
16. Topping 2100	\$ 0,0575	\$ 0,1511	\$ 0,7095
17. Condensado Top 2100	\$ 0,0581	\$ 0,1518	\$ 0,7101
18. Tratamientos con H2	\$ 0,0215	\$ 0,1151	\$ 0,6735
19. Planta de ácido	\$ 0,0132	\$ 0,1068	\$ 0,6652
20. Cracking IV D-350	\$ 0,0267	\$ 0,1203	\$ 0,6787
21. Cracking IV D-339	\$ 0,0176	\$ 0,1112	\$ 0,6696
22. Crack orthoflow T-501	\$ 0,0140	\$ 0,1076	\$ 0,6660
23. Crack orthoflow E-567	\$ 0,0300	\$ 0,1236	\$ 0,6820
24. Crack UOP-1 E-2700	\$ 0,0141	\$ 0,1077	\$ 0,6661
25. Aguas agrias	\$ 0,0080	\$ 0,1016	\$ 0,6600
26. Trat parafínicos con H2	\$ 0,0381	\$ 0,1317	\$ 0,6901
27. Trat nafténicos con H2	\$ 0,0302	\$ 0,1238	\$ 0,6822
28. Generación de H2	\$ 0,0545	\$ 0,1481	\$ 0,7065
29. Recup Vapores UOP-1	\$ 0,0210	\$ 0,1146	\$ 0,6730
30. Remoción HC PTAR	\$ 0,0111	\$ 0,1047	\$ 0,6631

Planta	Distancia (m)	Pérdidas(m)	GPM	m3/h	Area (m)	Diámetro (m)	D. real (in)	Pot (KW)	ΔP (KPa)
1. Clarificación	1630	2934	12560	2852,7	0,33017361	0,648375035	24	362,7	293,3
2. Suavización	1630	2934	1260	286,17	0,03312153	0,205357366	10	27,88	212,9
3. Desmineralización	1630	2934	1600	363,4	0,04206019	0,231414568	10	52,03	336,7
4. Generac vapor	420	756	265	60,18	0,00696528	0,094172549	6	1,909	35,12
5. TE - 831	700	1260	148	33,6	0,00388889	0,070366811	4	2,508	151,2
6. TE - 890/845	900	1620	222	50,42	0,00583565	0,086198489	6	2,733	95,94
7. TE - 2945	1600	2880	75	17,034	0,00197153	0,050102172	3	2,67	373,4
8. Topping 150	1200	2160	29	6,5866	0,00076234	0,031155081	4	0,1406	7,089
9. Condensado Top 150	1200	2160	38,6	8,767	0,0010147	0,035943779	3	0,4274	81,19
10. Topping 200	1200	2160	36	8,1765	0,00094635	0,034712185	2	1,689	508,1
11. Condensado Top 200	1200	2160	28,4	6,4504	0,00074657	0,03083128	2	0,962	352,8
12. Topping 250	1300	2340	35	7,9494	0,00092007	0,03422673	2	1,683	522
13. Condensado Top 250	1300	2340	18,9	4,2927	0,00049684	0,025151478	1,5	0,9906	573,7
14. Topping 2000	1200	2160	5,2	1,1811	0,0001367	0,013192939	1	0,2	407,6
15. Condensado Top 2000	1200	2160	17,8	4,0428	0,00046792	0,024408403	2	0,2804	136,9
16. Topping 2100	1400	2520	14,6	3,316	0,0003838	0,022105762	1,5	0,5302	381,9
17. Condensado Top 2100	1400	2520	14,7	3,3387	0,00038642	0,022181297	1,5	0,5398	386,7
18. Tratamientos con H2	820	1476	10	2,2713	0,00026288	0,018295129	1,5	0,136	111,3
19. Planta de ácido	850	1530	216,1	49,0817	0,00568075	0,085046811	6	1,8	48,46
20. Cracking IV D-350	1000	1800	59,3	13,4685	0,00155885	0,04455104	3	1	150,2
21. Cracking IV D-339	1000	1800	42,82	9,72	0,001125	0,037846992	3	0,4768	81,96
22. Crack orthoflow T-501	1600	2880	164	37,25	0,00431134	0,074090303	4	1,449	54,53
23. Crack orthoflow E-567	1600	2880	50	11,35	0,00131366	0,040897444	3	0,9466	174,8
24. Crack UOP-1 E-2700	3250	5850	113	25,66	0,00296991	0,061493124	6	1,006	55,65
25. Aguas agrias	3250	5850	360	81,7	0,00945602	0,109725928	10	1,825	40,1
26. Trat parafínicos con H2	1300	2340	10	2,27	0,00026273	0,018289893	1,5	0,2407	236
27. Trat nafténicos con H2	1300	2340	10	2,27	0,00026273	0,018289893	1,5	0,1907	176,5
28. Generación de H2	1300	2340	82	18,62	0,00215509	0,052382723	3	2,82	359
29. Recup Vapores UOP-1	3250	5850	54	12,26	0,00141898	0,042505337	4	0,7152	107,1
30. Remoción HC PTAR	2300	4140	102	23,1668	0,00268134	0,058429377	6	0,7134	32,64
Roughness	0,00015 ft								

\$/galón bom	\$Tuberia/m	\$ total tub	\$ bombas	\$ mant tub	\$ mant bom	\$ tub + bomb	galones	\$/galón tub	\$/galón total
\$ 0,0457						Interés 26% EA			
\$ 0,0350									
\$ 0,0515									
\$ 0,0114	\$ 63.070	\$ 26.489.400	\$ 36.518.040	\$ 6.622.350	\$ 18.259.020	\$ 279.117.014	696420000	\$ 0,4008	\$ 0,4122
\$ 0,0268	\$ 49.810	\$ 34.867.000	\$ 16.800.000	\$ 8.716.750	\$ 8.400.000	\$ 218.443.223	388944000	\$ 0,5616	\$ 0,5885
\$ 0,0195	\$ 63.070	\$ 56.763.000	\$ 36.518.040	\$ 14.190.750	\$ 18.259.020	\$ 399.295.521	583416000	\$ 0,6844	\$ 0,7039
\$ 0,0564	\$ 43.180	\$ 69.088.000	\$ 17.400.000	\$ 17.272.000	\$ 8.700.000	\$ 357.150.124	197100000	\$ 1,8120	\$ 1,8684
\$ 0,0077	\$ 49.810	\$ 59.772.000	\$ 16.200.000	\$ 14.943.000	\$ 8.100.000	\$ 314.451.534	76212000	\$ 4,1260	\$ 4,1337
\$ 0,0175	\$ 43.180	\$ 51.816.000	\$ 17.400.000	\$ 12.954.000	\$ 8.700.000	\$ 288.584.668	101440800	\$ 2,8449	\$ 2,8624
\$ 0,0743	\$ 36.550	\$ 43.860.000	\$ 12.960.000	\$ 10.965.000	\$ 6.480.000	\$ 235.850.560	94608000	\$ 2,4929	\$ 2,5672
\$ 0,0536	\$ 36.550	\$ 43.860.000	\$ 12.960.000	\$ 10.965.000	\$ 6.480.000	\$ 235.850.560	74635200	\$ 3,1600	\$ 3,2137
\$ 0,0761	\$ 36.550	\$ 47.515.000	\$ 12.960.000	\$ 11.878.750	\$ 6.480.000	\$ 250.359.982	91980000	\$ 2,7219	\$ 2,7980
\$ 0,0830	\$ 33.235	\$ 43.205.500	\$ 9.000.000	\$ 10.801.375	\$ 4.500.000	\$ 214.388.127	49669200	\$ 4,3163	\$ 4,3993
\$ 0,0609	\$ 29.920	\$ 35.904.000	\$ 8.160.000	\$ 8.976.000	\$ 4.080.000	\$ 181.401.521	13665600	\$ 13,2743	\$ 13,3352
\$ 0,0249	\$ 36.550	\$ 43.860.000	\$ 12.960.000	\$ 10.965.000	\$ 6.480.000	\$ 235.850.560	46778400	\$ 5,0419	\$ 5,0668
\$ 0,0575	\$ 33.235	\$ 46.529.000	\$ 9.000.000	\$ 11.632.250	\$ 4.500.000	\$ 227.581.578	38368800	\$ 5,9314	\$ 5,9889
\$ 0,0581	\$ 33.235	\$ 46.529.000	\$ 9.000.000	\$ 11.632.250	\$ 4.500.000	\$ 227.581.578	38631600	\$ 5,8911	\$ 5,9492
\$ 0,0215	\$ 33.235	\$ 27.252.700	\$ 9.000.000	\$ 6.813.175	\$ 4.500.000	\$ 151.059.560	26280000	\$ 5,7481	\$ 5,7696
\$ 0,0132	\$ 63.070	\$ 53.609.500	\$ 36.518.040	\$ 13.402.375	\$ 18.259.020	\$ 386.776.927	567910800	\$ 0,6811	\$ 0,6942
\$ 0,0267	\$ 43.180	\$ 43.180.000	\$ 17.400.000	\$ 10.795.000	\$ 8.700.000	\$ 254.301.940	155840400	\$ 1,6318	\$ 1,6585
\$ 0,0176	\$ 43.180	\$ 43.180.000	\$ 17.400.000	\$ 10.795.000	\$ 8.700.000	\$ 254.301.940	112530960	\$ 2,2598	\$ 2,2775
\$ 0,0140	\$ 49.810	\$ 79.696.000	\$ 1.800.000	\$ 19.924.000	\$ 900.000	\$ 324.947.543	430992000	\$ 0,7540	\$ 0,7679
\$ 0,0300	\$ 43.180	\$ 69.088.000	\$ 17.400.000	\$ 17.272.000	\$ 8.700.000	\$ 357.150.124	131400000	\$ 2,7180	\$ 2,7480
\$ 0,0141	\$ 63.070	\$ 204.977.500	\$ 36.518.040	\$ 51.244.375	\$ 18.259.020	\$ 987.669.465	296964000	\$ 3,3259	\$ 3,3400
\$ 0,0080	\$ 89.590	\$ 291.167.500	\$ 79.044.000	\$ 72.791.875	\$ 39.522.000	\$ 1.532.402.608	946080000	\$ 1,6197	\$ 1,6278
\$ 0,0381	\$ 33.235	\$ 43.205.500	\$ 9.000.000	\$ 10.801.375	\$ 4.500.000	\$ 214.388.127	26280000	\$ 8,1578	\$ 8,1960
\$ 0,0302	\$ 33.235	\$ 43.205.500	\$ 9.000.000	\$ 10.801.375	\$ 4.500.000	\$ 214.388.127	26280000	\$ 8,1578	\$ 8,1880
\$ 0,0545	\$ 43.180	\$ 56.134.000	\$ 17.400.000	\$ 14.033.500	\$ 8.700.000	\$ 305.726.032	215496000	\$ 1,4187	\$ 1,4732
\$ 0,0210	\$ 49.810	\$ 161.882.500	\$ 18.000.000	\$ 40.470.625	\$ 9.000.000	\$ 728.378.952	141912000	\$ 5,1326	\$ 5,1536
\$ 0,0111	\$ 63.070	\$ 145.061.000	\$ 36.518.040	\$ 36.265.250	\$ 18.259.020	\$ 749.816.169	268056000	\$ 2,7972	\$ 2,8083
			total de tuberías nuevas instaladas			\$ 4.861.120.901			

### ANEXO 3. Posible ubicación del punto de distribución en la GCB



## **ANEXO 4. Microsoft excel solver**

Solver es una herramienta de optimización que hace parte del paquete Microsoft Excel. Con Solver, puede buscarse el valor óptimo para una fórmula de celda, denominada celda objetivo, en una hoja de cálculo. Solver funciona en un grupo de celdas que estén relacionadas, directa o indirectamente, con la fórmula de la celda objetivo. Solver ajusta los valores en las celdas cambiantes que se especifiquen, denominadas celdas ajustables, para generar el resultado especificado en la fórmula de la celda objetivo. Pueden aplicarse restricciones para restringir los valores que puede utilizar Solver en el modelo y las restricciones pueden hacer referencia a otras celdas a las que afecte la fórmula de la celda objetivo.

Solver puede determinar el valor máximo o mínimo de una celda sujeto a la variación de otras celdas, o variables, y a una serie de restricciones previamente especificadas.

La herramienta Microsoft Excel Solver utiliza el código de optimización no lineal (GRG2) desarrollado por la Universidad Leon Lasdon de Austin (Texas) y la Universidad Allan Waren (Cleveland ).

Los problemas lineales y enteros utilizan el método más simple con límites en las variables y el método de ramificación y límite, implantado por John Watson y Dan Fylstra de Frontline Systems, Inc.

### **Premium Solver**

Premium Solver es la actualización básica de Frontline al solver que viene con Microsoft Excel. Incluye todos los últimos mejoramientos en velocidad y precisión del Solver Estándar de Excel, nuevos reportes de sensibilidad y complementos para los clásicos algoritmos lineales y no lineales. Cualquier modelo que trabaje con el Solver estándar, funcionará con el Solver Premium pero con mayor velocidad y precisión.

Una vez que Solver Premium esté instalado, puede resolver problemas de optimización no uniformes o problemas uniformes no lineales de un máximo de 400 variables y 200 restricciones. Puede resolver problemas lineales de hasta 1000 variables con un número ilimitado de restricciones.

Entre los mejoramientos de la interfase se incluye una forma más flexible de especificar las variables de decisión (celdas cambiantes) que pueden estar dispersas por toda la hoja de cálculo; mayor control sobre la solución de problemas enteros y tolerancias; y por último, reportes de progreso más informativos en la barra de estatus.

Entre los mejoramientos de los reportes de Solver se incluye un nuevo reporte de población para el solver evolucionario y nuevos reportes de linealidad y viabilidad.

### **Premium Solver Platform**

Premium Solver Platform incluye todas las características del “Premium Solver” además de un amplio rango de mejoras a cada una de los motores de optimización de Solver. Incluye un nuevo interpretador capaz de analizar fórmulas de Microsoft Excel.

Premium Solver Platform es la plataforma para soportar otros motores de solver, en el caso de que se necesite resolver problemas de optimización de mayor envergadura.

### **Large-Scale LP Solver**

Large-Scale LP Solver está diseñado para resolver problemas de programación lineal con más de 2000 variables, que es el límite que tiene el motor "LP/Quadratic Solver". Tales problemas requieren métodos algorítmicos diferentes para manipular grandes cantidades de datos numéricos y para mantener la precisión numérica después de cientos de miles de millones de cálculos aritméticos flotantes.

Large-Scale LP Solver utiliza avanzados métodos de factorización de matrices tales como la descomposición LU y la refactorización dinámica de Markowitz; para ambos, velocidad y estabilidad numérica.

La versión básica resuelve hasta 4000 variables y 4000 restricciones, otras versiones pueden resolver hasta 65000 variables y 65000 restricciones