



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**“CONSIDERACIÓN DE LA ACEPTABILIDAD EN LA SÍNTESIS  
ÓPTIMA DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-  
INDUSTRIALES”**

TESIS presentada por:

**Guillermo Aguilar Oropeza**

A la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Química como requisito parcial  
para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

Asesor: **Dr. José María Ponce Ortega**

Morelia, Michoacán

Agosto del 2018

## ABSTRACT

Consideration of acceptability in the optimum synthesis of water networks in eco-industrial parks

By

I.Q. Guillermo Aguilar Oropeza

August of 2018

Master in Chemical Engineering Sciences

Supervised by Dr. Jose Maria Ponce Ortega

This Thesis proposes a superstructure that considers the recycling and reuse of water in an eco-industrial park, where different industries share wastewater as well as a treatment system to meet their water needs in their process units. The involved flows as well as the treatment system become optimization variables and the objective is to synthesize the network that allows satisfying water requirements at the lowest possible cost for each of the involved industries, thus approaching the individual utopian point of each participating industry. Based on the proposed superstructure, a MINLP mathematical model was implemented which involves mass balances and properties of the involved streams on the various points of mixing and division of the same. Also, the equations corresponding to the water treatment equipment as well as the economic objective functions for each of the considered industries are contemplated. Subsequently, the individual objectives of each industry are determined to find the utopian point. With this information, a strategy is implemented that allows obtaining a compromise solution that is closest to the utopian point. The proposed strategy also proposes the generation of a set of solutions that compensate the different objectives to identify the weight of each industry involved in the eco-industrial park.

**Keywords:** Eco-Industrial Parks, Optimization, Water Integration, Dissatisfaction.

**IQ. Guillermo Aguilar Oropeza**

## RESUMEN

Consideración de la aceptabilidad en la síntesis óptima de redes de agua en parques eco-industriales

I.Q. Guillermo Aguilar Oropeza

Agosto del 2018

Maestría en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega

En este trabajo se propone una superestructura que considera el reciclado y reuso de agua en un parque eco-industrial, en donde diversas industrias comparten aguas residuales así como un sistema de tratamiento para satisfacer las necesidades de agua en sus diversos equipos de proceso. Los flujos involucrados así como el sistema de tratamiento se convierten en variables de optimización y el objetivo es sintetizar la red que permita satisfacer los requerimientos de agua al menor costo posible para cada una de las industrias involucradas, acercándose de esta manera al punto utópico individual de cada industria participante. En base a la superestructura propuesta se implementó un modelo matemático MINLP que involucra balances de masa y propiedades de las corrientes involucradas sobre los diversos puntos de mezclado y división de la misma. También, se contemplan las ecuaciones correspondientes a los equipos de tratamiento de agua así como las funciones objetivo económicas para cada una de las industrias involucradas. Posteriormente, se determinan los objetivos individuales de cada industria para encontrar el punto utópico. Con esta información se implementa una estrategia que permite obtener una solución compromiso que es la más cercana al punto utópico. En la estrategia propuesta también se plantea la generación de un conjunto de soluciones que compensan los diferentes objetivos para identificar el peso de cada industria involucrada en el parque eco-industrial.

**Palabras clave:** Eco-Parques Industriales, Optimización, Integración de Agua, Insatisfacción.

## **IQ. Guillermo Aguilar Oropeza**

### **DEDICATORIA**

A mis padres José Antonio Aguilar García y Dora Luz Oropeza Sosa por todo el amor y el apoyo incondicional que me han brindado para cumplir cada uno de mis objetivos, por los valores y las enseñanzas que me dieron lo cual me permitió ser la persona que soy hoy en día.

A mis sobrinos Santiago López Aguilar, María Fernanda Tapia Aguilar por robarme siempre una sonrisa y Emmanuel Emiliano Tapia Aguilar † por enseñarme en el corto tiempo que estuvo con nosotros lo que es luchar.

A mis hermanos Yulliana y Mireya por estar siempre a mi lado con su apoyo incondicional.

A Elizabeth Herrera Oseguera y Fam. Herrera Oseguera, por siempre tener una palabra de aliento durante los momentos de duda.

A mis amigos de Maestría Ing. Iliana Chijate Salguero, Ing. Francisco Franco, Ing. Cesar Adrián Huerta Mata, Ing. Pablo Jahir Peña Obeso, M.C Iván Gonzales Guido, por brindarme su amistad y el apoyo necesario para cumplir con esta meta.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi asesor el Dr. José María Ponce Ortega por haberme dado la oportunidad de formar parte de su grupo de alumnos de posgrado, por todo el tiempo, apoyo, la confianza y motivación que me brindo, así como también por los conocimientos proporcionados, los cuales fortalecieron mi formación tanto profesional como personal.

A mis maestros de maestría y sinodales de mi trabajo de tesis por todas las enseñanzas y apoyo brindado.

Al Dr. Juan Carlos Ballesteros Pacheco y el MC. Gerardo Ortiz Rodríguez, por sus consejos y las palabras de aliento.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme permitido realizar esta experiencia de crecimiento personal y académico.

A CONACYT por los recursos proporcionados.

## ÍNDICE

ABSTRACT.....	ii
RESUMEN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
NOMENCLATURA.....	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Marco Teórico.....	3
1.1.1 Redes de agua.....	3
1.1.1.1 Componentes de una red de agua.....	3
1.1.2 Parques eco-industriales.....	4
1.1.3 Sustentabilidad.....	5
1.1.4 Integración de procesos .....	5
1.1.5 Optimización.....	6
1.1.5.1 Optimización de un sistema.....	6
1.1.5.2 GAMS.....	8
1.1.5.3 Usos de GAMS.....	8
1.1.5.4 Tipos de modelos soportados.....	8
1.2 Antecedentes.....	9
1.3 Hipotesis.....	11
1.4 Objetivos.....	11
1.4.1 Objetivo general.....	11
1.4.2 Objetivos específicos.....	11
1.5 Justificación.....	12
1.6 Alcances.....	12
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Planteamiento del problema.....	14
2.2 Diseño de la superestructura.....	15
2.3 Modelo matemático.....	16
2.4 Recolección de datos.....	24
2.4.1 Especificaciones.....	24
3 RESULTADOS.....	25
3.1 Caso de estudio.....	25
3.2 Análisis de caso de estudio.....	26

3.2.1 Minimizando el costo total anua para el usuario 1.....	27
3.2.2 Minimizando el costo total anua para el usuario 2.....	29
3.2.3 Minimizando el costo total anua para el usuario 3.....	31
3.2.4 Minimizando el consumo de agua para todos los usuarios del EPI.....	33
3.2.5 Minimizando la solución compromiso.....	35
3.2.6 Minimizando el TAC total.....	37
3.2.7 Multi-stake Holder.....	39
4. CONCLUSIONES.....	44
5. REFERENCIAS.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Etapas para resolver un problema de optimización	7
2	Esquema del eco parque Industrial de Kalundborg, Dinamarca	9
3	Diagrama de la metodología	13
4	Superestructura de la síntesis óptima de redes de agua en parques eco-industriales	15
5	Configuración de eco-parque industrial minimizando TAC1	28
6	Configuración de eco-parque industrial minimizando TAC2	30
7	Configuración de eco-parque industrial minimizando TAC3	32
8	Configuración de eco-parque industrial minimizando el consumo de agua	34
9	Configuración de eco-parque industrial minimizando la solución compromiso	36
10	Configuración de eco-parque industrial minimizando el TAC total del EPI	38
11	Pesos asignados diferentes usuarios	39
12	Diagrama de PARETO	42
13	Configuración del EPI con el menor porcentaje de insatisfacción total	43

## ÍNDICE DE TABLAS

Tablas		Página
1	Tabla de especificaciones para caso de estudio	25
2	Tabla de minimización de los objetivos	26
3	Tabla de tuberías existentes y flujos para minimización de TAC1	27
4	Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando TAC2	29
5	Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando TAC3	31
6	Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando para el consumo de agua	33
7	Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando la solución compromiso	35
8	Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando el TAC total del EPI	37
9	Tabla de pesos generados en MATLAB	40
10	Tabla de porcentajes de insatisfacción	41

## NOMENCLATURA

### Parámetros

$C U_p$	Costo unitario de tubería, US\$
$C U_r$	Coefficiente de costo de inversión para unidad de tratamiento, US\$.
$C U M_r$	Costo unitario para masa removida en cada unidad de tratamiento, US\$/kg.
$C U_w$	Costo unitario de agua fresca, US\$/kg.
$D_{i,j}^1$	Distancia entre la fuente $i$ y el sumidero $j, m$ .
$D_{i,r}^2$	Distancia entre la fuente $i$ y el interceptor $r, m$ .
$D_{r,j}^3$	Distancia entre interceptores $r$ y sumidero de proceso $j, m$ .
$D_i^5$	Distancia entre la fuente $i$ y la descarga ambiental, $m$ .
$F S_i$	Flujo de fuente de proceso $i$ , kg/h
$F U_j$	Flujo del sumidero de proceso $j$ , kg/h
$H_y$	Horas de operación de planta por cada año, h/año.
$K_F$	Factor usado para la animalización del costo capital, 1/año.
$M_{fier}^{\max}$	Límite máximo del segmento de tubería del interceptor a la descarga, kg/h.
$M_{fisir,j}^{\max}$	Límite máximo del segmento de tubería del interceptor a la fuente, kg/h.
$M_{fsei}^{\max}$	Límite máximo del segmento de tubería de la fuente a la descarga, kg/h.
$M_{fsü,r}^{\max}$	Límite máximo del segmento de tubería de la fuente al interceptor, kg/h.
$M_{fssi,j}^{\max}$	Límite máximo del segmento de tubería de la fuente al sumidero, kg/h.
$M_{fier}^{\min}$	Límite mínimo del segmento de tubería de cada unidad de tratamiento a la descarga, kg/h.

$M_{fsr,j}^{\min}$	Límite mínimo del segmento de tubería de cada unidad de tratamiento a la fuente, kg/h.
$M_{fsei}^{\min}$	Límite mínimo del segmento de tubería de la fuente a la descarga, kg/h.
$M_{fsii,r}^{\min}$	Límite mínimo del segmento de tubería de la fuente a la unidad de tratamiento, kg/h.
$M_{fssi,j}^{\min}$	Límite mínimo del segmento de tubería de la fuente al sumidero, kg/h.
$P$	Parámetro para costo de capital de la tubería de planta cruzada.
$RR_{r,\psi_p(P_p)}$	Factor de eficiente del operador de propiedad, adimensional
$\rho$	Densidad del agua, kg/m <sup>3</sup> .
$v$	Velocidad, m/s.
$\psi_p^{\min}$	Límite mínimo del operador de propiedad.
$\psi_p^{\max}$	Límite máximo del operador de propiedad.

### Variables

$\alpha$	Parámetro que atiende las economías de escala, adimensional.
$CS$	Solución compromiso.
$FR_r$	Flujo en cada interceptor $r$ , kg/h.
$PC_{SP}$	Costo de capital de la tubería de planta cruzada por cada planta, US\$/año.
$RC_{SP}$	Costo de regeneración por cada planta, US\$/año.
$TAC_{SP}$	Costo total anual por cada planta, US\$/año.
$TAC_1$	Costo total anual para la planta 1, US\$/año.
$TAC_2$	Costo total anual para la planta 2, US\$/año.
$TAC_3$	Costo total anual para la planta 3, US\$/año.

$TOTALFRESW$	Agua fresca total consumida, kg/h.
$WC_{sp}$	Costo de agua fresca por cada planta, US\$/año.
$FE$	Flujo de agua a la descarga ambiental, kg/h.
$fi_{e,r}$	Flujo del interceptor a la descarga ambiental, kg/h.
$fi_{i,r}$	Flujo del interceptor $r_1$ a los interceptores, kg/h.
$fi_{s,j}$	Flujo de interceptores a proceso de sumidero, kg/h.
$FR_R$	Flujo en el interceptor, kg/h.
$fse$	Flujo de la fuente de proceso a la descarga, kg/h.
$fsi_{i,r}$	Flujo de fuente de proceso a los interceptores, kg/h.
$fss_{i,j}$	Flujo de la fuente de proceso a los sumideros de proceso, kg/h.
$fws_{w,j}$	Flujo de agua fresca a los sumideros de procesos, kg/h.
$fsp_{sp}$	Costo de tubería para cada planta, US\$.
$fst$	Flujo de agua tratada, kg/h.
$fws_{w,j}$	Flujo de agua fresca $W$ a proceso de sumidero $j$ , kg/h.
$\psi_p$	Operador de propiedad.
$\psi_p (Pi_{p,r}^{in})$	Operador de propiedad a la entrada del interceptor.
$\psi_p (Pi_{p,r}^{out})$	Operador de propiedad a la salida del interceptor.
$\varphi_1$	Variable compromiso para planta 1, adimensional.
$\varphi_2$	Variable compromiso para planta 2, adimensional.
$\varphi_3$	Variable compromiso para planta 3, adimensional.

### VARIABLES BINARIAS

$X_{i,j}^1$	Existencia de segmento de tubería fuente-sumidero, 0 o 1.
$X_{i,r}^2$	Existencia de segmento de tubería fuente-interceptor, 0 o 1.
$X_{r,j}^3$	Existencia de segmento de tubería interceptor-sumidero, 0 o 1.
$X_r^5$	Existencia de segmento de tubería interceptor-descarga, 0 o 1.

### SUB-ÍNDICES

$i$	Fuente de proceso.
$j$	Sumidero de proceso.
$p$	Propiedades.
$r$	Interceptor de propiedad.
$W$	Tipos de agua fresca.

### CONJUNTOS

$W$	$\{W=1,2,\dots,N_{\text{Tipos de agua fresca}}\}$ $W$ es un conjunto de tipos de agua fresca.
$K$	Números de escenarios.
$I$	$\{j = 1, 2, \dots, N_{\text{Sumideros}}\}$ $J$ es un conjunto de sumideros de proceso.
$J$	$\{i = 1, 2, \dots, N_{\text{Fuentes}}\}$ $I$ es un conjunto de fuentes proceso.
$R$	$\{1,2,\dots,N_{\text{Interceptores}}\}$ $R$ es un conjunto de interceptores de propiedad.
$SP$	$\{SP=1,2,\dots,N_{\text{Numerodeplantas}}\}$ $SP$ es un conjunto de numero de plantas.
$N$	Números de funciones objetivos.
$L$	Números de propiedades.

### SUPER-ÍNDICES

*UP*      Límite superior.

*LOW*      Límite inferior

## 1 INTRODUCCION

La industria por lo general suele necesitar de una gran cantidad de agua; ya que un gran número de productos necesitan de grandes cantidades de agua para ser fabricados. Debido a esto, el agua para uso industrial cada vez es más tratada y reutilizada para distintas tareas internas, permitiendo así ahorrar agua potable y reducir los gastos asociados al costo unitario del mencionado recurso.

En los distintos rubros industriales, el agua juega un papel fundamental en las diferentes etapas de los procesos (por ejemplo, el enfriamiento o calentamiento). En las últimas décadas, la disponibilidad de este indispensable recurso ha disminuido significativamente, incrementado el precio del mismo para la actividad mencionada. Debido a esto, varios trabajos se han enfocado en encontrar alternativas para lograr una mayor eficiencia en su uso. En este sentido, se han presentado modelos de programación mixta-entera lineal para maximizar el reuso del agua en procesos industriales (Bagajewicz,2000). También, se han presentado diversos procedimientos sistemáticos basados en reglas heurísticas, métodos tabulares y soluciones gráficas para determinar los objetivos en redes de agua en las industrias (Dunn y El-Halwagi, 2003). Adicionalmente, se han reportado revisiones bibliográficas de métodos basados en programación matemática para la síntesis de redes de agua en las industrias (Yee Foo, 2009). Sin embargo, los métodos reportados no han considerado las diferencias entre los diversos objetivos que tienen las industrias participantes en un parque eco-industrial. Cuando se considera un objetivo global de las diversas industrias como el objetivo de la síntesis se da intrínsecamente prioridad a la industria de mayor tamaño, lo que hace inaceptable por las otras industrias la implementación de la solución. En este sentido, en este trabajo se propone un modelo de optimización que considera los objetivos individuales de todas las industrias participantes en un parque eco-industrial.

Las metodologías reportadas para la integración másica entre diferentes plantas se pueden clasificar en métodos gráficos, algebraicos y de programación matemática. Debido a las problemáticas para la obtención de recursos, la integración de procesos ha demostrado ser una de las herramientas más importantes para mejorar la eficiencia y el uso de los

recursos disponibles, se han desarrollado múltiples trabajos de investigación que buscan abordar la resolución del problema de la disponibilidad del agua dulce mediante el reciclado y reutilización del agua, logrando avances muy importantes en la minimización de aguas residuales en las industrias de proceso mediante la maximización de la reutilización del agua (Rubio-Castro y col., 2013). Por otra parte, existen investigaciones que abordan la integración del agua entre plantas mediante métodos gráficos basados en la técnica del punto de pliegue (Spriggs y col, 2004). Mientras que los artículos de Chew y col. (2007), Foo, (2008), Bandyopadhyay y col. (2010), Chew y col. (2010) presentan enfoques algebraicos para la síntesis de la red de agua en la cual se maximiza la recuperación de agua dentro de una única red de agua, los caudales de agua dulce y agua residual pueden reducirse aún más considerando la recuperación de agua entre varias redes de agua a través de la integración hídrica entre plantas.

Por su parte, Liao y col. (2007) establecen un diseño flexible entre plantas, considerando ciertas características que participan en la integración de múltiples plantas, como la flexibilidad operativa y los costos elevados de operación, hacen que el número de interconexiones entre las plantas sea un parámetro importante del problema para la minimización del agua. De tal manera, al combinar la técnica de punto de pliegue con la programación matemática, determinan que el objetivo de uso de agua dulce y las condiciones de interconexiones entre plantas se obtienen sin considerar el diseño detallado de la red de interconexión. Posteriormente, se establece un modelo MILP para el diseño de redes flexibles de agua de plantas individuales. Mientras que Aviso y col. (2010) plantean un modelo para optimizar la reutilización de agua y aguas residuales entre varias plantas contenidas en un parque eco-industrial, pero en este modelo incorpora programación matemática difusa, que se utiliza para identificar la red óptima que satisfaga los objetivos confusos de las plantas participantes. Mientras que Ponce-Ortega y col. (2009, 2010) presentaron un método de programación matemática para considerar las propiedades en la síntesis de redes de agua. Adicionalmente, Rubio Castro y col. (2013) propusieron un modelo basado en optimización global para la integración del agua entre plantas basada en propiedades para caracterizar flujos con numerosos componentes. Este tipo de formulación determina múltiples mínimos locales, por lo que plantean reglas de ramificaciones, sin

embargo dicho trabajo no contempla las prioridades de los participantes involucrados en el parque eco-industrial, el cual es el propósito de esta investigación. Además de la integración de tomadores de decisiones para el análisis de multi-objetivos, a fin de obtener resultados óptimos para todos los participantes. Algunas de las investigaciones donde se proponen la de toma de decisiones para el cálculo de soluciones compromiso que equilibren las prioridades conflictivas de múltiples partes interesadas en objetivos múltiples, se obtiene una distribución de insatisfacción de las partes interesadas, al resolver un problema de minimización de valor condicional. Este enfoque permite calcular una familia de soluciones de compromiso y generaliza la configuración de múltiples interesados que minimiza las insatisfacciones promedio y de peor caso (Dowling y col., 2016).

## **1.1. MARCO TEÓRICO**

### **1.1.1 Redes de agua**

Una red de distribución es el conjunto de tuberías, accesorios y estructuras que conducen el agua desde tanques de servicio o de distribución hasta la toma destinada. La prioridad de una red de agua es proporcionar a los usuarios agua para su consumo doméstico, público, comercial, industrial y para condiciones extraordinarias como el extinguir incendios.

#### **1.1.1.1 Componentes de una red de agua**

Una red de distribución de agua potable se compone generalmente de:

a) Tuberías: Se le llama así al conjunto formado por los tubos y su sistema de unión o ensamble. Para fines de análisis se denomina tubería al conducto comprendido entre dos secciones transversales del mismo. La red de distribución está formada por un conjunto de tuberías que se unen en diversos puntos denominados nudos o uniones. De acuerdo con su función, la red de distribución puede dividirse en: red primaria y red secundaria. A la tubería que conduce el agua desde el tanque de regulación hasta el punto donde inicia su distribución se le conoce como línea de alimentación, y se considera parte de la red primaria. La división de la red de distribución en red primaria o secundaria dependerá del tamaño de la red y de los diámetros de las tuberías. De esta forma, la red primaria se

constituye de los tubos de mayor diámetro y la red secundaria por las tuberías de menor diámetro, las cuales abarcan la mayoría de las calles de la localidad. Así, una red primaria puede ser una sola tubería de alimentación o cierto conjunto de tuberías de mayor diámetro que abarcan a toda la localidad.

b) Piezas especiales: Son todos aquellos accesorios que se emplean para llevar a cabo ramificaciones, intersecciones, cambios de dirección, modificaciones de diámetro, uniones de tuberías de diferente material o diámetro, y terminales de los conductos, entre otros. A las piezas o conjuntos de accesorios especiales con los que, conectados a la tubería, se forman deflexiones pronunciadas, cambios de diámetro, derivaciones y ramificaciones se les llama cruceros. También permiten el control del flujo cuando se colocan válvulas (Comisión Nacional del Agua, 2007).

### **1.1.2 Los eco-parques industriales**

Los eco-parques industriales son empresas las cuales se encuentra dentro de una misma zona industrial, mismas que cooperan entre sí, compartiendo recursos para alcanzar una mejora económica o social. A su vez mediante esta relación entre las industrias se logra una mejora sobre los impactos al medio ambiente y se obtiene de manera directa una disminución en el consumo de recursos (Lamber y Boons 2002).

Debido a lo anterior en diversos países industrializados, se han producido iniciativas para llevar a cabo la generación de eco-parque industrial. Los cuales están basados principalmente en el intercambio de recursos entre las industrias pesadas en complejos industriales. En general, se hace mención de estas iniciativas mediante los conceptos de simbiosis industrial y parques eco-industriales. Desde entonces, el concepto de parques eco-industriales se ha extendido a otro tipo de parque industrial, el llamado parque industrial mixto, que consta de pequeñas empresas y medianas empresas (PYME), que en algunas ocasiones son complementadas por un pequeño número de industrias más grandes. Debido a la creciente ambigüedad resultante en la importancia de las iniciativas de parques eco-industriales, es deseable una tipología para explicar la confusión que este término puede generar. Es por ello que se argumenta que los parques industriales mixtos están poco investigados, aunque tienen un gran impacto positivo tanto ambiental como económico esto

a partir de una consideración general de las iniciativas de parques eco-industriales (Lamber y Boons 2002).

Específicamente, debido a la creciente preocupación ambiental, existe evidencia de que al aumentar la relación simbiótica entre las plantas en la misma área industrial, beneficia en gran medida al desarrollo sostenible de las actividades industriales. El concepto de ecología industrial extendido a los términos del parque eco-parque industrial o simbiosis industrial es el tema de investigación exhaustiva desde los últimos años. Incluso, ya existen muchos ejemplos y realizaciones de eco-parques en todo el mundo, muchas propuestas de eco-parque están en progreso pero no se han logrado (Boix y col., 2015).

### **1.1.3 Sustentabilidad**

La sustentabilidad es la capacidad que tiene una sociedad para hacer un uso consciente y responsable de sus recursos, sin agotarlos o exceder su capacidad de renovación, y sin comprometer el acceso a estos por parte de las generaciones futuras. La sustentabilidad juega un papel muy importante en la gestión de una empresa. Al tratar de mejorar el rendimiento de sostenibilidad de una empresa, hay tres factores principales que deben abordarse. Primero, la evaluación de la sostenibilidad requiere considerar no solo los impactos económicos, sino también ambientales y sociales. En segundo lugar, necesitamos encontrar indicadores de sustentabilidad apropiados y recopilar los datos necesarios para cuantificar el desempeño de la sustentabilidad. Por último, la sustentabilidad tiene que ser visto en el contexto de todo el sistema, es decir, tiene que incluir todas las actividades a lo largo de la cadena de suministro (Zhang y col., 2014).

### **1.1.4 Integración de procesos**

La integración de procesos es un enfoque holístico para el diseño y la operación del proceso que da la importancia a la unidad del proceso. Las herramientas para el diseño de integración en los procesos se han desarrollado en los últimos 20 años para lograr una mejora dentro de los procesos, la mejora de la productividad, la conservación de la masa y

los recursos energéticos, además de la reducción en los costos operacionales y los costos de capital de los procesos químicos. Las principales aplicaciones para la optimización e integración han priorizado la conservación de los recursos, la prevención de la contaminación y la gestión energética. Específicamente, en las últimas dos décadas se desarrollaron y/o aplicaron herramientas de diseño de integración de procesos para redes de intercambio de calor, redes de conservación de agua y de reducción de aguas residuales, redes de intercambio masivo y redes de separación inducidas por calor y energía, redes de unidades de tratamiento para residuos y redes de minimización de desechos inducidas por calor y energía (El-Halwagi 2003).

### **1.1.5 Optimización**

La optimización se define como la búsqueda de la mejor solución en base a los criterios asignados, los cuales pueden ser en cuestión economía, tiempo, etc. La optimización tiene influencia en todas las actividades que son realizadas dentro de la sociedad, tanto en el ámbito social como en su mayor parte en el ámbito industrial. Aunque la optimización se ha practicado de una forma u otra esta área ha experimentado un crecimiento progresivo durante las últimas cinco décadas. La sociedad moderna vive no solo en un ambiente de alta competitividad, sino que también se ve obligado a planificar su crecimiento de manera sostenible con la debida preocupación por la conservación de los recursos. La optimización de un sistema requiere de estrategias especiales para manejar los objetivos múltiples a fin de proporcionar soluciones más cercanas a la solución óptima. La teoría de optimización había evolucionado inicialmente para proporcionar soluciones genéricas a los problemas de optimización en dominios lineales, no lineales, sin restricciones y contraídos. Estos problemas de optimización a menudo se llamaban problemas de programación matemática con dos clasificaciones distintivas, la programación lineal y no lineal (Diwekar, 2008).

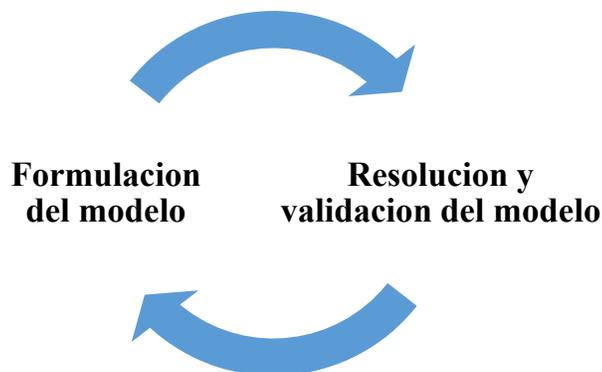
#### **1.1.5.1 Optimización de un sistema**

Para la optimización de un sistema es necesario establecer un objetivo, el cual trata de maximizar algún tipo de beneficio o salidas del sistema, o de minimizar algún tipo de costo o entradas al proceso. Donde las relaciones entre el sistema serán reflejadas en forma

de balances de materia, balances de energía, ecuaciones de diseño y estipulaciones de algunas variables las cuales constituirán algunas restricciones bajo las cuales la búsqueda del objetivo se llevará a cabo.

Si dentro del sistema existe solo un grado de libertad, se considera que es un caso de optimización con una sola variable, pero si existen varios grados de libertad, entonces la optimización se conoce como multi-variable. Las relaciones que existen entre el objetivo y las restricciones del sistema, también nos ayudan a clasificar el tipo de problema que se está abordando. Por ejemplo, si todas las relaciones existentes en el problema son lineales se determina que se tiene un problema de programación lineal, en cambio si la regla anterior no se cumple se tiene un problema de programación no lineal. Por otra parte, si alguna de las variables es una variable discreta, lo cual indica que solo puede tener valores que son enteros, esto indica que tenemos un problema de programación entera, en cambio si todas las variables de búsqueda son enteras, o de programación mixta-entera, si algunas variables son continuas y otras son enteras; estos tipos de formulaciones pueden ser lineales o no lineales, dependiendo de la relaciones matemáticas que los estipulan.

La resolución de los problemas de optimización requiere pasar por dos etapas (ver **Figura 1**).



**Figura 1** Etapas para resolver un problema de optimización.

### 1.1.5.2 GAMS

El Sistema de modelado algebraico general (GAMS) es un software de alto nivel para el modelado de sistema (Brooke y col., 2017) donde su uso está orientado a la optimización matemática. GAMS está diseñado para modelar y resolver problemas lineales, no lineales y optimización entera mixta. El sistema está diseñado para aplicaciones de modelado a gran escala, el cual permite al usuario construir grandes modelos matemáticos que pueden adaptarse a las nuevas situaciones. El sistema está disponible para su uso en distintas plataformas informáticas.

### 1.1.5.3 Usos de GAMS

GAMS permite que el usuario se concentre en el modelado. Al eliminar la necesidad de pensar en los problemas puramente técnicos específicos de la máquina, tales como cálculos de direcciones, tareas de almacenamiento, vinculación subrutina, entrada-salida y control de flujo, GAMS aumenta el tiempo disponible para la conceptualización y la ejecución del modelo, y el análisis de los resultados. El lenguaje GAMS es de fácil interpretación. Por lo tanto, es familiar para cualquier persona con experiencia en programación. Utilizando GAMS, los datos se introducen una sola vez en la lista y en forma de tabla. Los modelos se describen en expresiones algebraicas concisas que son fáciles para los seres humanos y las máquinas para leer. Conjuntos completos de restricciones estrechamente relacionadas se introducen en un comunicado.

### 1.1.5.4 Tipos de modelos soportados

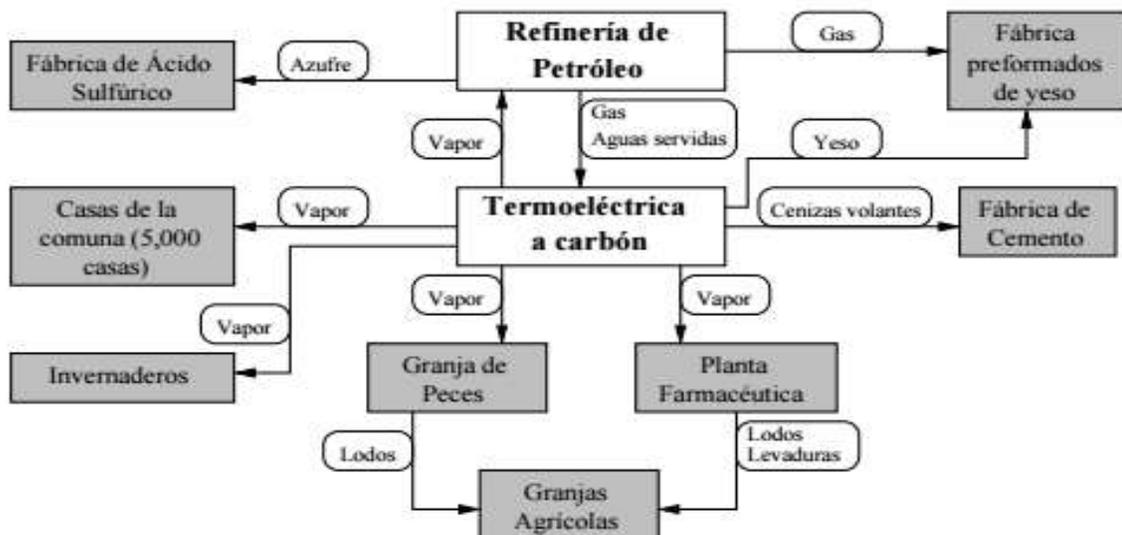
Los tipos de modelo que incluye GAMS son del tipo lineal (LP), mixto entero lineal (MIP), mixto entero no lineal (MINLP), y las diferentes formas de problemas no lineales (NLP), y puede soportar los siguientes tipos de modelos básicos:

- ❖ LP Programación lineal.
- ❖ MIP Programación entera mixta.
- ❖ NLP Programación no lineal.
- ❖ MCP Problemas complementarios mixtos.
- ❖ MPEC Programas matemáticos con restricciones de equilibrio.

- ❖ CNS Sistemas restringidos no lineales.
- ❖ DNLP Programación no lineal con derivadas discontinuas.
- ❖ MINLP Programación con mezcla de integración y no lineal.
- ❖ QCP Programación cuadrática restringida.
- ❖ MIQCP Programas con restricciones de mezcla de integración cuadrática.

## 1.2 ANTECEDENTES

El intercambio de desechos, subproductos y energía entre empresas cercanas es una de las características distintivas de las aplicaciones de los principios ecológicos industriales (Ehrenfeld y Gertler, 1997). Como una sub-disciplina de la ecología industrial, la simbiosis industrial se relaciona con la optimización de los recursos entre las empresas ubicadas dentro de una zona industrial. El complejo de simbiosis industrial en Kalundborg, Dinamarca es el ejemplo de un eco-parque industrial (Brings Jacobsen, 2008). En 1993, Indigo Development introdujo el concepto de Parques Eco-industriales o “Eco-industrial Parks” (EIP) para que fuese absorbido por la Environmental Protection Agency (EPA) del gobierno de los EEUU. Dos años después, bajo indicios del Consejo Presidencial Sobre Desarrollo Sostenible, los proyectos de Parques Eco-industriales se asimilaron como proyectos de demostración. En la **Figura 2** se muestra el eco-parque de Kalundborg, Dinamarca.



**Figura 2** Esquema del eco parque Industrial de Kalundborg, Dinamarca.

Debido a que el agua es uno de los recursos que es usado en mayor proporción se han realizado investigaciones para determinar una estrategia adecuada para lograr una mayor eficiencia en el uso de este recurso. Trabajos donde se establece como objetivo el desarrollo de enfoques basados en la optimización del diseño e integración de parques eco-industriales. El enfoque se da a la gestión del agua entre múltiples procesos en una instalación de un eco-parque industrial. El reciclaje, la reutilización y la separación con dispositivos de interceptación se consideran estrategias posibles para gestionar las aguas residuales. Donde se utiliza una representación estructural fuente-intercepción-sumidero para incorporar configuraciones potenciales de interés. La representación incluye las posibilidades de reciclaje directo, intercambio de materiales (residuos), mezcla y segregación de diferentes flujos, separación y tratamiento en unidades de intercepción, y asignación a usuarios de procesos (sumideros). Luego, el problema de diseño de eco-parque industrial se formula como un programa de optimización cuyo objetivo es minimizar el costo del eco-parque industrial mientras se determinan las estrategias óptimas de reciclaje y separación (El-Halwagi, 2009). A su vez se ha abordado la problemática de la optimización de las redes de agua desde un enfoque global para la integración del agua entre plantas basada en propiedades para la caracterización de flujos con numerosos componentes. Los cuales están basados en una superestructura que involucra todas las opciones posibles de interés (es decir, reutilización y reciclaje en el mismo y otras plantas y un conjunto de unidades de tratamiento compartidas), el cual el objetivo principal es determinar una configuración la cual represente el mínimo costo total anual dentro del eco-parque industrial (Rubio-Castro y col., 2012). Debido a que trabajos anteriores ofrecen una solución global este trabajo está enfocado a obtener una configuración dentro del eco-parque industrial que sea satisfactoria para cada uno de los participantes dentro de él, obteniendo así una solución individual adecuada para cada uno, es decir, un costo total anual menor para cada usuario, y no una solución global como se ha manejado en trabajos anteriores.

La optimización de redes no solo está enfocada al nivel industrial, se han propuesto trabajos para la optimización de redes agua y su uso en el área de agricultura mediante un modelo de programación matemática para el diseño óptimo de redes de agua. Donde se

propone una superestructura que incluye todas las configuraciones en términos de uso, reutilización y regeneración del agua en un campo constituido por varias tierras de cultivo. Incluyéndose la asignación de tuberías, bombas y tanques de almacenamiento en diferentes períodos de riego. Aquí la principal función objetivo es la obtención del máximo ingreso debido a la venta del cultivo menos los costos de agua dulce, fertilizantes, tanques de almacenamiento, unidades de tratamiento, tuberías y bombeo (Rubio-Castro y col., 2015).

Por otra parte, otra forma de la aplicación de la optimización de las redes de agua ha sido de manera social, esto es involucrando los complejos residenciales donde es involucrada el agua de lluvia que se recolecta y a su vez el agua residual generada. Donde se busca equilibrar el costo anualizado total, el consumo de agua dulce e impacto ambiental (García Montoya y col., 2015).

### **1.3 HIPÓTESIS**

Con el nuevo modelo propuesto para la interacción de los parques eco-industriales considerando los diferentes usuarios, se permitirá una interacción en la que todos los usuarios tengan una disminución en su consumo del costo total anual, lo que favorecerá a la simbiosis industrial del sistema.

### **1.4 OBJETIVOS**

#### **1.4.1 Objetivo general**

Diseñar un modelo matemático que integre de manera óptima las redes de agua en un parque eco-industrial considerando el factor de aceptabilidad de cada empresa.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Aplicar el modelo propuesto a diferentes casos de estudio.
- Determinar los principales factores que afectan la interacción entre diferentes industrias.
- Proponer esquemas que permitan la interacción global de los parques eco-industriales.

## 1.5 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día, la situación actual en la industria ha exigido el desarrollo de estrategias eficientes para reducir simultáneamente el impacto ambiental y los costos asociados para producir procesos industriales sostenibles. En este sentido, por el hecho de que el agua es el recurso más utilizado en las industrias de procesos en los últimos años varias investigaciones han abordado el problema del uso eficiente del agua considerando el reciclado, reutilización y regeneración de este importante recurso en instalaciones industriales únicas (Es decir, la integración de una sola planta de agua).

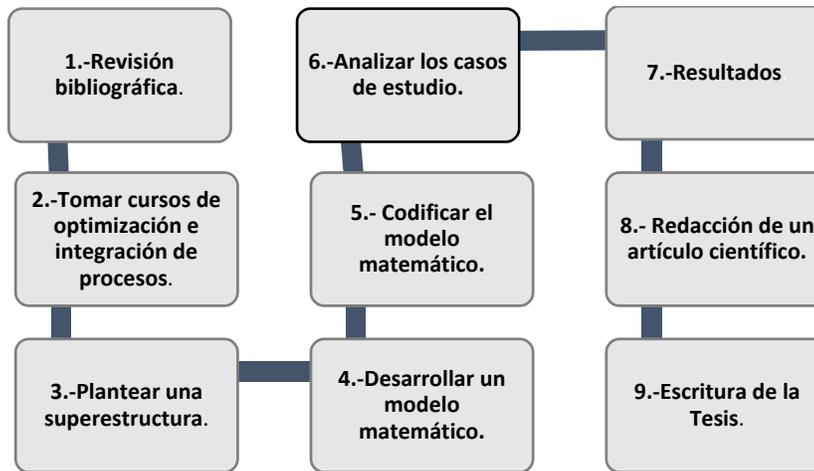
Por lo cual, en el presente trabajo de investigación se propone desarrollar un modelo matemático para la síntesis óptima de redes de agua, considerando una disminución del costo total anual para cada participante dentro del eco-parque industrial, es decir una solución que satisfaga en los objetivos particulares de los usuarios y no como un objetivo global esto a través de un modelo multi-objetivo.

## 1.6 ALCANCES

En el presente trabajo se puede observar que es posible encontrar soluciones donde existe un balance entre aspectos económicos y ambientales por medio de la integración del proceso para el diseño e instalación de las redes de agua dentro de un eco-parque industrial. El modelo propuesto representa una herramienta importante para la toma de decisiones a fin generar la mejor opción, la cual permita tener el mejor escenario que permita un menor impacto económico pero a su vez este permita obtener un menor impacto ambiental

## 2. METODOLOGIA

Para resolver la problemática planteada, se propone la siguiente metodología en la que se involucra los pasos enlistados (ver **Figura 3**).



**Figura 3** Diagrama de la metodología.

1. Se realizó una extensa revisión bibliográfica, la cual incluye información respecto de los eco-parques industriales, la optimización de redes de agua en eco-parques, tanto aspectos generales como aspectos específicos, y así determinar los factores que afectan a las redes de agua para su optimización.

2. Se tomaron cursos de optimización con el objeto de aprender a identificar los tipos de problemas, como se pueden resolver (Metodologías computadas), y la toma de decisiones sobre una buena optimización.

3. Se planteó una superestructura para la optimización de redes de agua dentro de un eco-parque industrial la cual incluye todas las actividades que son llevadas a cabo dentro del eco-parque, la cual considera el reúso o reciclaje de agua, además de tomar en cuenta que se presenta una planta de regeneración compartida.

4. En base a la superestructura generada se procedió a desarrollar un modelo de optimización para las redes de agua

5. Posteriormente se procedió a codificar el modelo en el software GAMS.

6. Una vez que el código fue depurado, se procedió a analizar el caso estudio con diferentes escenarios. Estos resultados permitirán evaluar de manera, económica, ambiental y social.

7.- Finalmente, se procedió a reportar los resultados obtenidos, así como a la escritura y defensa de la tesis.

### **2.1 Planteamiento del problema**

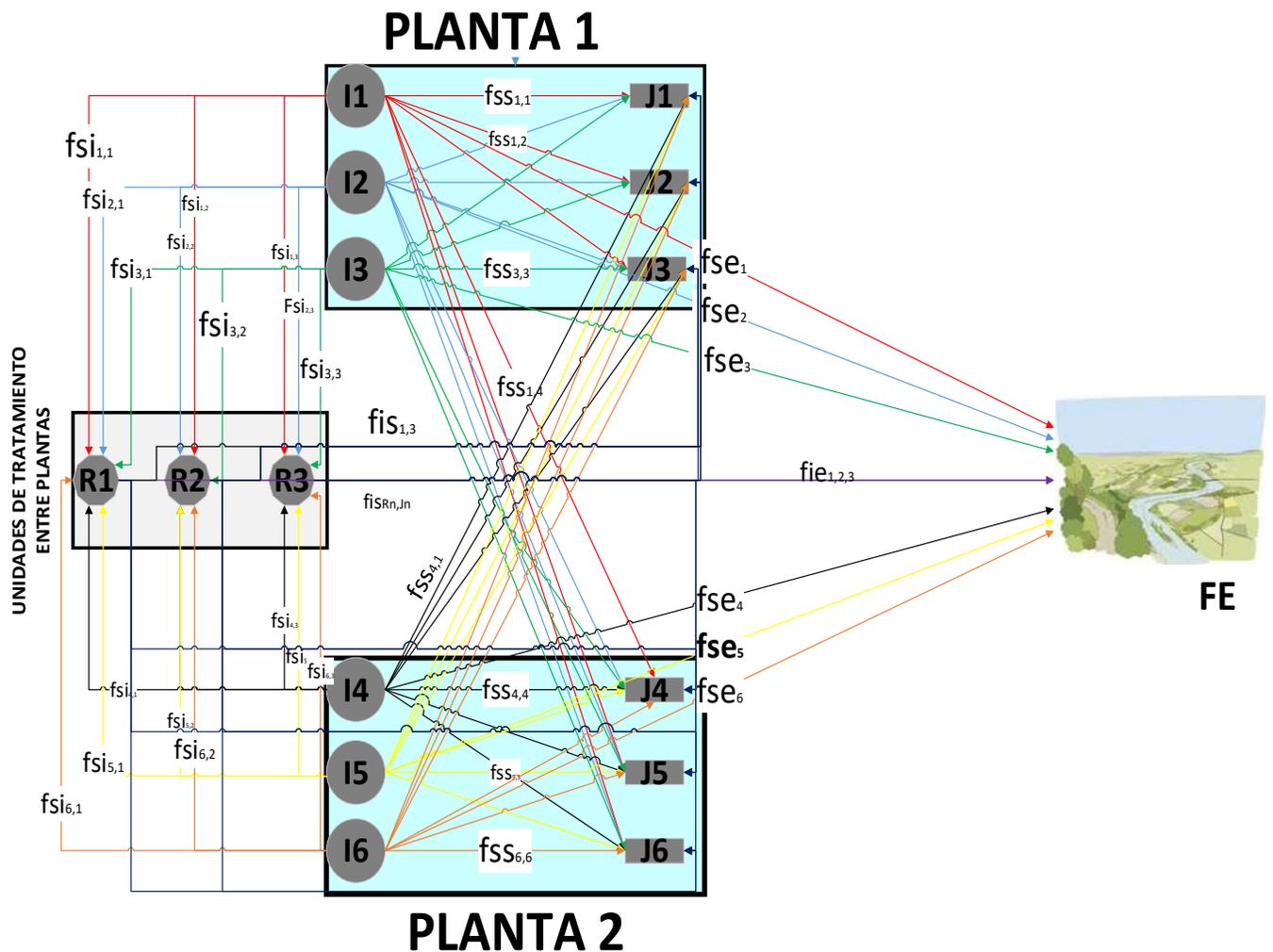
La situación actual de la actividad industrial demanda el desarrollo de estrategias eficientes para reducir simultáneamente el impacto ambiental y los costos asociados a fin de generar procesos industriales sostenibles. En este sentido, el agua es probablemente el recurso más utilizado en las industrias de procesos y, en los últimos años, varias investigaciones han abordado el problema del uso eficiente del agua considerando el reciclado, reutilización y regeneración de este importante recurso en instalaciones industriales únicas (la integración de una sola planta de agua), así como, la integración entre plantas (parques eco-industriales). Los parques eco-industriales son una manera en la cual las empresas cooperan entre sí para lograr objetivos mutuos en relación a términos sustentables. Tendiendo como base el compartir de manera eficiente los recursos (agua, energía y diferentes recursos), y lograr un aumento de las ganancias económicas.

Debido a esto, se han realizado trabajos sobre parques eco-industriales y la interacción que hay entre ellos, donde se aportan modelos matemáticos para su diseño y modernización de redes de agua (Rubio- Castro y col., 2012). No obstante, en las metodologías reportadas no se ha tenido en cuenta la sustentabilidad global del parque eco-industrial.

Debido a que la sustentabilidad es una parte muy importante, una de las formas de mejorar la sustentabilidad se basa en extender el retorno económico convencional sobre la inversión, incluyendo los impactos benéficos o perjudiciales del proyecto (El-Halwagi, 2016). Por lo tanto, en el presente trabajo de investigación se propone desarrollar un modelo matemático para la síntesis óptima de redes de agua, considerando el factor de sustentabilidad global así como la interacción de los diferentes usuarios de un parque eco-industrial a través de un modelo multi-objetivo.

## 2.2 Diseño de la superestructura

Se propone una superestructura que considera el reciclo y reúso de agua en un parque eco-industrial, en donde diversas industrias comparten aguas residuales así como un sistema de tratamiento para satisfacer sus necesidad de agua en sus diversos equipos de procesos. Los flujos involucrados así como el sistema de tratamiento se convierten en variables de optimización y el objetivo es sintetizar la red que permita satisfacer los requerimientos de agua al menor costo posible para cada una de las industrias involucradas, acercándose de esta manera el punto utópico individual de cada industria participante. Esto se ve reflejado en la **Figura 4**.



**Figura 4** Superestructura de la síntesis óptima de redes de agua en parques eco-industriales.

En base a la superestructura propuesta, se implementa un modelo matemático que involucra balances de masa y propiedades de las corrientes consideradas sobre los diversos puntos de mezclado y división de la misma. También se contemplan las ecuaciones correspondientes a los equipos de tratamiento de agua así como las funciones objetivos económicas para cada una de las industrias involucradas. Posteriormente se determinan los objetivos individuales de cada industria para encontrar el punto utópico. Con esta información se implementa una estrategia que permite obtener una solución compromiso que es la más cercana al punto utópico. En la estrategia propuesta también se plantea la generación de un conjunto de soluciones que compensan los diferentes objetivos para identificar el peso de cada industria involucrada en el parque eco-industrial.

### 2.3 Modelo matemático

#### ❖ Funcion objetivo:

La función objetivo del modelo propuesto está enfocada en la disminución del costo total anual ( $TAC_{SP}$ ) para cada uno de los participantes dentro del eco-parque industrial, la cual se encuentra en función del costo de agua fresca para cada planta ( $WC_{SP}$ ), el costo de regeneración de agua fresca para cada planta ( $RC_{SP}$ ) y el costo de tubería para cada planta participante ( $PC_{SP}$ ). El cálculo del ( $TAC_{SP}$ ) se realiza con la siguiente ecuación,

$$TAC_{SP} = WC_{SP} + RC_{SP} + PC_{SP}, \forall SP \quad (1)$$

#### ❖ Costo de agua fresca:

El costo de agua fresca para cada planta está relacionado con las horas de operación ( $H_Y$ ) la cual se determina en horas por año y se determina con la siguiente formula,

$$WC_{SP} = H_Y \sum_{j \in J_p} \sum_{w \in W_p} f w S_{w,j} CU_w, \forall SP \quad (2)$$

Donde  $fws_{w,j}$  es el flujo de agua fresca,  $W$  en el sumidero del proceso  $j$ , y  $CU_w$  es el costo establecido para el agua fresca.

❖ Costo del capital de la tubería:

El costo del capital de la tubería se determina por la longitud de la tubería que existe entre las plantas participantes, además de otras características de la tubería, como el tipo de material, entre otros. Por ejemplo, la Ecuación 3 fue adaptada para la integración de la planta por Chew y col (2008) de Kim y Smith (2004). En esta el costo de capital de la tubería está correlacionado con el área de la sección transversal de la tubería e incluye los costos fijos y variables para cada uno de los segmentos de la tubería.

$$PC_{SP} = K_F \left\{ \begin{array}{l} P \sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_p} \left( \frac{D_{i,j}^1 f s_{i,j}}{3600 \rho v} + x_{i,j}^1 D_{i,j}^1 CU_p \right) + P \sum_{i \in I_p} \sum_{r=1} \left( \frac{D_{i,r}^2 f s_{i,r}}{3600 \rho v} + x_{i,r}^2 D_{i,r}^2 CU_p \right) + \\ P \sum_{r=1} \sum_{j \in J_p} \left( \frac{D_{r,j}^3 f i s_{r,j}}{3600 \rho v} + x_{r,j}^3 D_{r,j}^3 CU_p \right) + P \sum_{i=I_p} \left( \frac{D_i^5 f s e_i}{3600 \rho v} + x_i^5 D_i^5 CU_p \right) \end{array} \right\} \quad (3)$$

Donde  $K_F$  es el factor que se utiliza para anualizar los costos de capital,  $P$  representa el parámetro para el costo de capital de la tubería entre las plantas,  $D_{i,j}^1$  es la distancia entre la fuente y el sumidero,  $D_{i,r}^2$  que representa la distancia entre la fuente y los interceptores,  $D_{r,j}^3$  indica la distancia entre el interceptor y el sumidero,  $D_i^5$  es la distancia que existe entre la fuente y la descarga al medio ambiente,  $\rho$  es la densidad del agua,  $v$  es la velocidad del agua y  $CU_p$  es el costo de la unidad de tubería.

❖ Costo de la regeneración del agua fresca:

Para el costo de la regeneración del agua fresca, los costos de capital y la operación de los interceptores de propiedades para cada planta una de las plantas se calcula de la siguiente manera,

$$RC_{SP} = K_F \sum_R CU_r FR_r^\alpha + H_Y \sum_R \sum_J f i s_{r,j} CUM_{r,L} \quad (4)$$

Donde  $CU_r$  es el coeficiente de costo de inversión,  $CUM_r$  es el costo unitario de masa removida en cada interceptor y  $FR_r$  es el flujo de agua en los interceptores.

❖ Balance de masa para cada fuente de proceso:

El flujo de cada fuente de proceso ( $FS_i$ ) puede segmentarse y dirigirse a cada sumidero de proceso ( $fss_{i,j}$ ), a cada interceptor ( $fsi_{i,r}$ ), y a la descarga ambiental ( $fse_i$ )

$$FS_i = \sum_{j \in J} fss_{i,j} + \sum_{r \in R} fsi_{i,r} + fse_i, i \in I \quad (5)$$

La Ecuación 4 representa la reutilización y reciclado de las fuentes de agua dentro de la misma planta y otras plantas, así como en los interceptores, que son compartidas por las plantas participantes. Además, de considerar el caudal de aguas residuales descargado al medio ambiente.

❖ Balances de masa y reglas de mezcla de propiedades para cada sumidero de proceso:

El caudal requerido por los sumideros de proceso ( $FU_j$ ) es generado por las fuentes de proceso que se les envían ( $fss_{i,j}$ ), los caudales de los interceptores ( $fis_{r,j}$ ), y el agua dulce ( $fws_{w,j}$ ) necesario para cumplir con las restricciones respecto a los límites inferior y superior ( $\psi_p(Pu_{p,j}^{max}, \psi_p(Pu_{p,j}^{min})$ ) (Observe que para evitar complicaciones numéricas debido a las relaciones de mezcla no lineales, el operador de propiedad es la variable de optimización en lugar de las propiedades) .

$$FU_j = \sum_{r \in R} fis_{r,j} + \sum_{i \in I} fss_{i,j} + \sum_{w \in W} fws_{w,j}, j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{r \in R} [\psi_p(Pi_{p,r}^{out}) fis_{r,j}] + \sum_{i \in I} [\psi_p(Ps_{p,i}) fss_{i,j}] + \sum_{w \in W} [\psi_p(Pw_{p,w}) fws_{w,j}] + \leq \psi_p(Pu_{p,j}^{max}) FU_j, j \in J; p \in P \quad (7)$$

$$\sum_{r \in R} \left[ \psi_p(Pi_{p,r}^{out}) fis_{r,j} \right] + \sum_{i \in I} \left[ \psi_p(PS_{p,i}) fss_{i,j} \right] + \sum_{w \in W} \left[ \psi_p(PW_{p,w}) fws_{w,j} \right] \geq \psi_p(Pu_{p,j}^{min}) FU_j, j \in J; p \in P \quad (8)$$

Los términos  $\psi_p(PS_{p,i})$  y  $\psi_p(PW_{p,w})$  son los operadores de propiedad para cada fuente  $i$  de proceso y cada agua fresca  $W$ , respectivamente. El operador de propiedad de salida para cada interceptor  $\psi_p(Pi_{p,r}^{out})$  y los caudales que se envían a cada receptor son variables de optimización, por lo tanto, el término  $\psi_p(Pi_{p,r}^{out})fis_{r,j}$  es bilineal y, en consecuencia, las ecuaciones 7 y 8 son relaciones no lineales y no convexas.

- ❖ Balances de masa y reglas de mezcla de propiedades para los interceptores de propiedad:

Un conjunto de interceptores de propiedad compartida se consideran para satisfacer las restricciones de propiedad de los sumideros en cada una de las plantas participantes y para las aguas residuales descargadas al medio ambiente. Las condiciones en términos de los operadores de velocidad de flujo y de propiedad en la entrada de cada interceptor  $FR_r, \psi_p(PP_{p,r}^{in})$  están determinadas por los caudales que se envían desde las fuentes de proceso ( $fis_{i,r}$ ) y de otras unidades de trataminetos ( $fis_{r_1,r}$ )

$$FR_r = \sum_{i \in I} fsi_{i,r} + \sum_{\substack{r_1 \in R \\ r_1 \neq r}} fii_{r_1,r}, r \in R \quad (9)$$

$$\psi_p(Pi_{p,r}^{in})FR_r = \sum_{i \in I} \left[ \psi_p(PS_{p,i}) fsi_{i,r} \right] + \sum_{\substack{r_1 \in R \\ r_1 \neq r}} \left[ \psi_p(Pi_{p,r_1}^{out}) fii_{r_1,r} \right], r \in R; p \in P \quad (10)$$

Debido a que las condiciones de entrada y salida para los interceptores y los caudales entre ellos son variables desconocidas, entonces la Ecuación 10 es una expresión no lineal y no convexa. Finalmente, el caudal de cada interceptor puede ser segregado y enviado a los sumideros de proceso ( $fis_{r,j}$ ), la descarga ambiental ( $fie_r$ ), y otras unidades de tratamiento ( $fii_{r,r_1}$ ). Además, los operadores de las propiedades de salida están determinados por el factor de eficiencia para cada interceptor ( $RR_r\psi_p(Pp)$ ),

$$FR_r = \sum_{j \in J} fis_{r,j} + \sum_{\substack{r_1 \in R \\ r_1 \neq r}} fii_{r,r_1} + fie_r, r \in R \quad (11)$$

$$\psi_p(Pi_{p,r}^{out}) = \psi_p(Pi_{p,r}^{in}) RR_{r,\psi_p(p_p)} \quad (12)$$

Este factor de eficiencia depende del tipo de variables la configuración y diseño de la unidad de tratamiento  $r$ , y se determina antes del proceso de optimización mediante simulaciones o empíricamente para evitar complejidades numéricas adicionales. En este sentido, en este trabajo, al igual que todos los trabajos previos para la integración de agua inter-planta, los factores de eficiencia se manipulan como constantes para evitar complicaciones numéricas adicionales. Esta suposición funciona correctamente debido a que se pueden simular varios interceptores con una configuración dada y condiciones de operación antes de la optimización, proporcionando una buena correlación para su eficiencia, mientras que los costos asociados dependen solamente del caudal tratado. Para tener en cuenta los límites del caudal y las propiedades que permitan un funcionamiento adecuado de las unidades de tratamiento, el modelo puede incluir restricciones de la propiedad y del caudal a la entrada a cada unidad de tratamiento. De esta manera, el modelo de optimización debe seleccionar el interceptor a utilizar y el caudal tratado. Además, el factor de eficiencia podría ser positivo o negativo dependiendo del tipo de interceptor y de la propiedad tratada.

- ❖ Balance de masas y reglas de mezcla de propiedades para el mezclador antes de que el flujo de residuos descargado al medio ambiente:

El caudal descargado al medio ambiente ( $FE$ ) y el valor para los operadores de propiedad  $\psi_p(Pe_p^{max}, \psi_p(Pe_p^{min}))$  en la corriente residual descargada al ambiente está formado por las porciones de los caudales de las fuentes de proceso ( $fse_i$ ) y de los interceptores de propiedad ( $fie_r$ ). El último término es una variable que multiplica el operador de la propiedad de salida de los interceptores, lo que produce un término bilineal en las Ecuaciones 14 y 15.

$$FE = \sum_{i \in I} fsi_i + \sum_{r \in R} fie_r \quad (13)$$

$$\sum_{i \in I} [\psi_p (Ps_{p,i}) fse_i] + \sum_{r \in R} [\psi_p (Pi_{p,r}^{out}) fie_r] \leq \psi_p (Pe_p^{\max}) FE, p \in P \quad (14)$$

$$\sum_{i \in I} [\psi_p (Ps_{p,i}) fse_i] + \sum_{r \in R} [\psi_p (Pi_{p,r}^{out}) fie_r] \geq \psi_p (Pe_p^{\min}) FE, p \in P \quad (15)$$

❖ Determinación de segmentos de tubería:

Para tener en cuenta el costo unitario de los segmentos de tubería requeridos en la configuración óptima, se incluye la siguiente disyunción que permite activar las variables binarias  $x$  asociadas a la existencia de cualquier segmento de tubería en la superestructura,

$$\left[ \begin{array}{l} X_{m,n} \\ f_{m,n} \geq M_{m,n}^{\min} \\ f_{m,n} \leq M_{m,n}^{\max} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg X_{m,n} \\ f_{m,n} = 0 \end{array} \right]$$

Donde,  $X_{m,n}$  es una variable booleana para seleccionar el costo unitario de cualquier tubo,  $f_{m,n}$  es el caudal en cualquier segmento de tubería que comienza en  $m$  y termine en  $n$ . Por lo tanto,  $m$  podría ser una fuente de proceso o una unidad de tratamiento, mientras que  $n$  podría ser un sumidero de proceso, una unidad de tratamiento o el residuo que se descarga al medio ambiente. Además,  $M_{m,n}^{\min}$  y  $M_{m,n}^{\max}$  son límites inferiores y superiores relacionados al caudal para determinar la existencia de cualquier segmento de tubería.

$$f_{m,n} \geq x_{m,n} M_{m,n}^{\min}, m \in M; n \in N \quad (16)$$

$$f_{m,n} \leq x_{m,n} M_{m,n}^{\max}, m \in M; n \in N \quad (17)$$

Las Ecuaciones 16 y 17 determinaran la existencia del segmento de tubería para cualquiera de las ubicaciones consideradas dentro de la superestructura. Observe que la variable binaria  $x_{m,n}$  es una representación general de las variables binarias

$(x_{i,j}^1, x_{i,r}^2, x_{r,j}^3, x_i^5)$  utilizado para determinar cualquier segmento de tubería en la superestructura y su costo asociado (véase la Ecuación 3).

❖ Cálculo de tuberías en cada planta:

Donde  $fsi_{i,r}$  está la suma de la tasa de flujo desde la fuente de proceso  $i$  hasta el interceptor para cada planta dentro del ecoparque industrial

$$fsp_{SP} = \sum_{i \in I_p} \sum_r fsi_{i,r} \forall SP \quad (18)$$

❖ Flujo de agua tratado:

Para determinar el flujo de agua que es tratado, este es calculado por medio de la siguiente ecuación, la cual se encuentra en función del flujo desde la fuente de proceso a los interceptores.

$$fst = \sum_{i \in I} \sum_r fsi_{i,r} \quad (19)$$

❖ Consumo de agua dentro del eco-parque industrial:

Para el cálculo del consumo de agua dentro del eco-parque industrial, se determina de la siguiente manera,

$$TOTALFRESW = \sum_W \sum_J fws_{w,j} \quad (20)$$

Donde  $fws_{w,j}$  es la tasa de flujo de agua fresca  $W$  en el proceso del sumidero  $j$ .

❖ Cálculo de los objetivos individuales para cada uno de los participantes:

El cálculo de los objetivos individuales para cada uno de los participantes, está determinado por el costo total anual ( $TAC_{SP}$ ),

$$OBJIND = TAC_{SP} \quad (21)$$

❖ Multi-Stake Holder:

$$\varphi_1 = \frac{TAC_1 - TAC_1^{UP}}{TAC_1^{UP} - TAC_1^{LOW}} \quad (22)$$

$$\varphi_2 = \frac{TAC_2 - TAC_2^{UP}}{TAC_2^{UP} - TAC_2^{LOW}} \quad (23)$$

$$\varphi_3 = \frac{TAC_3 - TAC_3^{UP}}{TAC_3^{UP} - TAC_3^{LOW}} \quad (24)$$

La de toma de decisiones multi-criterio, permite que los tomadores de decisiones se vuelvan una herramienta necesaria, la cual le permite a los usuarios involucrados elegir la mejor solución para lograr resultados óptimos. Primero, las coordenadas del punto de la utopía se usan para representar el límite inferior ( $TAC^{LOW}$ ) del individuo considerado funciones objetivas. El límite superior ( $TAC^{UP}$ ) representa la solución nadir para las diferentes funciones objetivas.

❖ Solución compromiso:

El cálculo de la solución compromiso es la suma de cada variable compromiso obtenida en las Ecuaciones 22, 23, 24, para cada planta. Esto significa que la brecha entre la solución para cada función objetivo y su límite superior debe reducirse (es decir, cada función objetivo será lo más cercana posible a su beneficio máximo), y no hay preferencia entre las partes interesadas.

$$CS = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 \quad (25)$$

El cálculo de la solución factible es mediante la siguiente fórmula, donde para cada participante se proponen 10 escenarios con diferentes pesos, los cuales se generan aleatoriamente en el programa MATLAB. En la solución factible se asume que cada función objetivo representa una parte interesada diferente y que estas partes interesadas

tienen un nivel diferente de influencia en el proceso de toma de decisiones; por lo tanto, se asignan diferentes pesos para cada uno de ellos. Si se minimiza la solución factible, cada uno de los objetivos individuales tratará de alcanzar su límite superior. Cada escenario se deben analizar de manera individual, y  $k$  representa un conjunto dado de ponderaciones. Por lo tanto, para cada configuración con diferentes pesos, tiene una solución individual ( $FCS(K)$ )

$$FCS(K) = (NK_{K,PLANT1})(TAC1) + (NK_{K,PLANT2})(TAC2) + (NK_{K,PLANT3})(TAC3) \quad (26)$$

La solución total factible en un escenario específico es,

$$FSTOT = FCS(K) \quad (27)$$

## 2.4 Recolección de datos

Una vez establecido el modelo matemático, es necesario la recopilación de información para alimentar dicho modelo, siendo esto parte de la revisión bibliográfica. Los datos deben de tener la mayor cercanía a la realidad; ya que de ello depende que los resultados obtenidos puedan aportar conocimiento significativo para la toma de decisiones durante la implementación del proyecto a escala industrial.

### 2.4.1 Especificaciones

Los datos presentados se propusieron a partir de valores típicos encontrados en la industria de procesos. Las horas de operación de la planta ( $H_Y$ ) son de 8000h/año, el factor utilizado para anualizar los costos de capital ( $K_F$ ) para cada año es de 0.231/año, la densidad el agua es de 1000 kg/m<sup>3</sup> y la velocidad del agua es de 1 m/s en las tuberías respectivamente. El material para las tuberías es acero al carbono con los parámetros de costo para la tubería entre plantas y el costo de tubería son iguales a \$7200 y \$250, respectivamente. La distancia para segmentos de tubería entre fuentes y sumideros en la misma planta es de 50 m para el resto de segmentos de tubería es de 200 m. **eficiencias de las unidades**

### 3. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados que se obtuvieron con el modelo de optimización propuesto, con el caso de estudio planteado y la configuración adecuada dentro del eco-parque industrial que permite el cumplimiento de la función objetivo.

#### 3.1 Caso de estudio

Este ejemplo consiste en tres plantas con tres fuentes de proceso y tres sumideros de proceso cada una, cuyos datos se muestran en la **Tabla 1**. Además, se consideran dos propiedades (composición y toxicidad) y un tipo de agua dulce pura está disponible con un costo unitario de 0.009 US \$/kg. Para este ejemplo, los límites inferiores para los operadores de propiedades son 0.01 ppm para la composición y 0.5% para la toxicidad, mientras que los límites superiores para los operadores anteriores son 0.22 ppm y 2.3%.

**Tabla 1** Tabla de especificaciones para caso de estudio.

			Composición (ppm)		Toxicidad(%)						
Plantas	Fuentes	Flujo(Kg/h)	Min	Max	Min	Max	Plantas	Sumideros	Flujo(Kg/h)	Composición (ppm)	Toxicidad(%)
1	1	2900	0	0.013	0	1.5	1	1	2900	0.033	1.8
	2	2450	0	0.011	0	0.75		2	2450	0.022	0.5
	3	8083	0	0.013	0	1.25		3	8083	0.016	2.3
2	4	3900	0	0.011	0	1.75	2	4	3900	0.024	1.5
	5	3279	0	0.1	0	1.15		5	3279	0.22	1.5
	6	3100	0	0.1	0	0.8		6	3100	0.01	0.75
3	7	1800	0	0.01	0	0.95	3	7	1800	0.16	1.4
	8	1750	0	0.04	0	0.75		8	1750	0.1	1.75
	9	2000	0	0.02	0.02	1.25		9	2000	0.11	1.3
Descarga			0	0.075	0	0		Agua Fresca		0	0
Propiedad			Interceptor			Cur(US\$)				CUMr(US\$Kg)	RR
Composición			1			7500				0.0065	0.02
			2			5000				0.0033	0.15
Toxicidad			3			9200				0.0098	0

Los dominios para cada operador de propiedad son  $0.01 \leq \varphi_c \leq 0.022$  y  $0.50 \leq \varphi_{tox} \leq 2.3$ , y se realizó una partición en el valor de 0.115 para la composición y 1.400 para la toxicidad. Luego, el dominio original para la composición está cubierto por dos nuevos

subdominios:  $0.01 \leq \varphi_c \leq 0.1150$  y  $0.115 \leq \varphi_c \leq 0.220$ , mientras que el dominio original de la toxicidad está cubierto por los siguientes dos subdominios:  $0.50 \leq \varphi_{tox} \leq 1.400$  y  $1.40 \leq \varphi_{tox} \leq 2.30$ ; y sus posibles combinaciones incluyendo el dominio original.

Para que la particion

### 3.2 Análisis del caso de estudio

Como se mencionó anteriormente, el modelo propuesto fue codificado en la plataforma GAMS (Brooke y col., 2017) para su aplicación a casos de estudios particulares. En relación al caso de estudio aquí abordado, el problema de optimización resultante consta de 425 variables y 442 restricciones y 76 variables binarias. Y para su ejecución computacional se empleó el solucionador DICOPT y se requirió entre 3 y 4 minutos para su solución. Esto utilizando una computadora con procesador Intel Core i7 a 2.40 GHz y 8 GB de RAM. En cuanto a los factores de peso para las funciones objetivo para cada uno de los escenarios en relación a la parte de múltiples partes interesadas o tomadores de decisiones fueron generados aleatoriamente en el software MATLAB. La resolución del problema fue a través de la consideración de diferentes factores tales como la minimización del consumo total anual para cada uno de los participantes (TAC<sub>SP</sub>), la minimización de la solución compromiso (CS), la minimización del consumo de agua (TOTALFRESH) y la minimización del costo de agua total de los usuarios dentro del eco-parque industrial. Cuyos resultados de las minimizaciones de cada uno de los objetivos se muestran en la **Tabla 2**.

**Tabla 2** Tabla de minimización de los objetivos.

TAC	TAC 1 \$US	TAC 2 \$US	TAC 3 \$US	TOTALFRESH(Ton/h)	TACTOTAL \$US
MIN TAC 1	1,688,300	1,781,400	1,790,800	8,871.48	5,260,500
MIN TAC 2	1,973,900	1,605,100	1,714,700	9,939.76	5,293,700
MIN TAC 3	1,967,500	1,776,000	1,507,100	8,886.02	5,250,600
MIN TOTALFRESH	7,734,100	7,623,700	7,420,300	0	22,778,100
MIN CS	16,003,000	15,748,000	15,361,000	74.01	47,112,000
MIN TACTOTAL	1,745,100	1,765,700	1,600,400	8,602.16	5,111,200

### 3.2.1 Minimizando costo total anual para el usuario 1 (TAC1)

Como se puede observar en la **Tabla 2**, cuando se realiza la minimización de TAC1, la cantidad que se obtiene es de \$1, 688,300 por año, mientras que el TAC3 alcanza un valor máximo de \$1, 790,800 por año, en cuanto al consumo de agua es de 8,871.48 ton/h y el costo total anual del eco-parque industrial considerando los 3 usuarios es de \$5,260,500 por cada año. La configuración que se obtiene en la minimización del TAC1 se puede apreciar en la **Figura 5**.

**Tabla 3** Tabla de tuberías existentes y flujos para minimización de TAC1

FUENTE-SUMIDERO		FLUJO Tn/h	FUENTE-INTERCEPTORES	FLUJO Tn/h	
1	5	974.710	2	4	970.383
	6	232.612	4	3	2845.283
	7	375.287	5	2	321.916
	8	530.303	7	2	447.873
	9	787.088		3	1352.127
2	1	401.643		2	391.054
	3	1077.974	8	3	1358.946
3	1	1803.991	9	3	2000
	2	117.788	<b>TUBERIAS Y FLUJOS EXISTENTES DENTRO DEL ECO-PARQUE INDUSTRIAL MINIMIZANDO PLANTA 1</b>		
	3	3147.723			
	4	2678.016			
	7	335.482			
4	2	1044.391	<b>INTERCEPTORES-SUMIDEROS</b>		
	7	10.326			
5	5	1344.248		4	3
	6	1374.199	2	9	813.106
6	8	238.636	<b>INTERCEPTORES-DESCARGA</b>		<b>FLUJO Tn/h</b>
	3	3100	3		

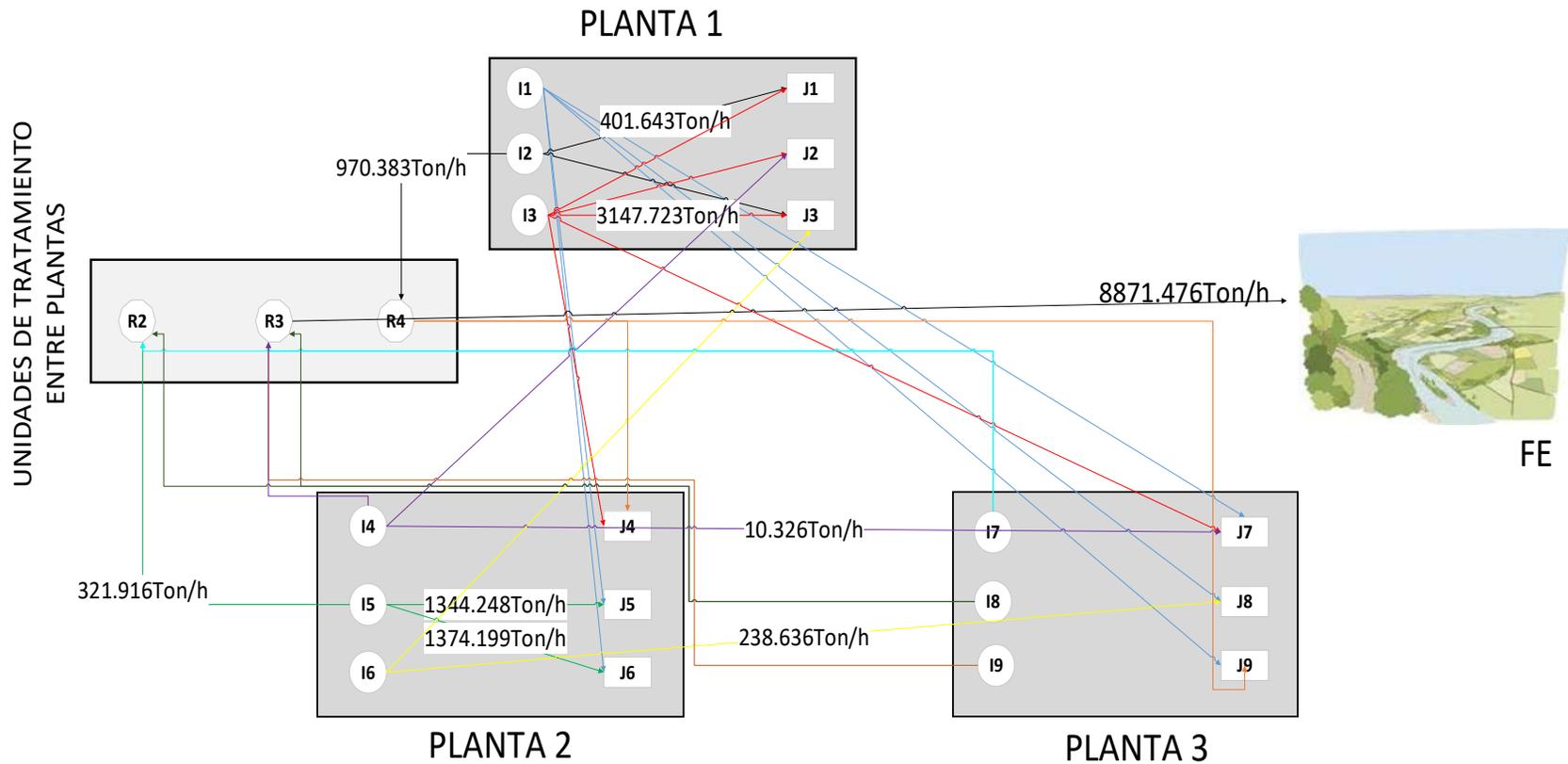


Figura 5 Configuración de eco-parque industrial minimizando TAC.

### 3.2.2 Minimizando costo total anual para el usuario 2 (TAC2)

Al minimizar el TAC2 obtenemos el valor mínimo del usuario 2, el cual es de \$1,605,100 por cada año, mientras que valor máximo se obtiene en el costo total anual del usuario 1 con \$1, 973,900 por cada año, con un consumo de agua dentro del eco-parque de 9,399.77 ton/h y con un costo total anual para los 3 usuarios de \$5,293,700 por cada año. La **Figura 6** presenta la configuración del eco-parque minimizando el TAC2.

**Tabla 4** Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando TAC2.

FUENTE-SUMIDERO		FLUJO Tn/h	FUENTE-INTERCEPTORES		FLUJO Tn/h			
2	6	1046.753	1	3	2900			
3	1	1533.654	2	2	655.781			
	2	676.176		4	747.466			
	3	3261.024	5	2	549.401			
	4	1700.125	7	2	73.344			
	7	450		3	1726.393			
	8	43.317	8	3	739.393			
	9	418.705	9	3	2000			
4	1	548.397	<b>TUBERIAS Y FLUJOS EXISTENTES DENTRO DEL ECO-PARQUE INDUSTRIAL MINIMIZANDO PLANTA 2</b>					
	3	1553.333						
	5	368.051						
	7	450						
	9	980.218						
5	5	1380.749						
	6	1304.416						
	9	44.434						
6	4	1569.8						
	5	1530.2						
8	2	161.312				<b>INTERCEPTORES-DESCARGA</b>		<b>FLUJO Tn/h</b>
	3	156.226				3		9392.041
	8	693.069						

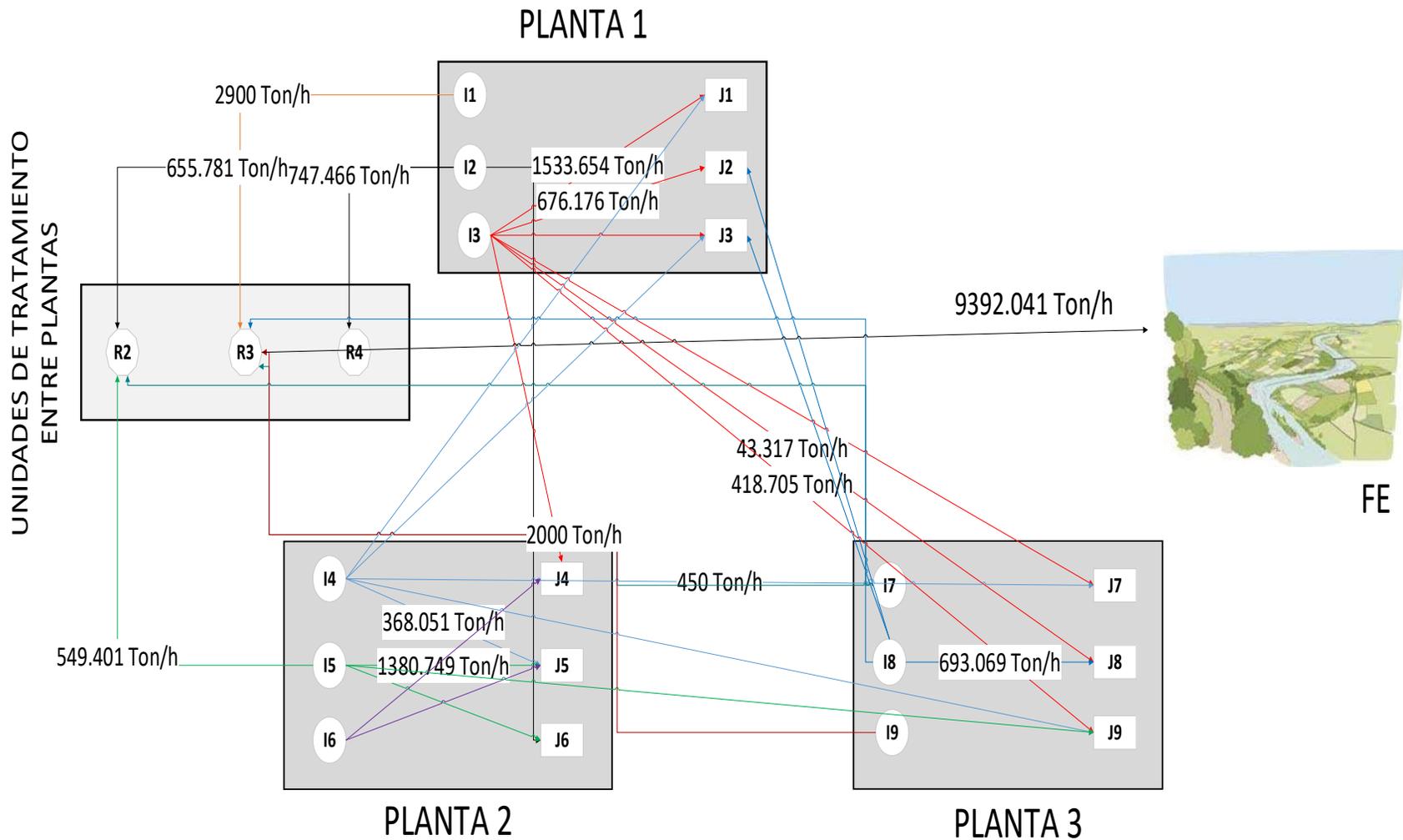


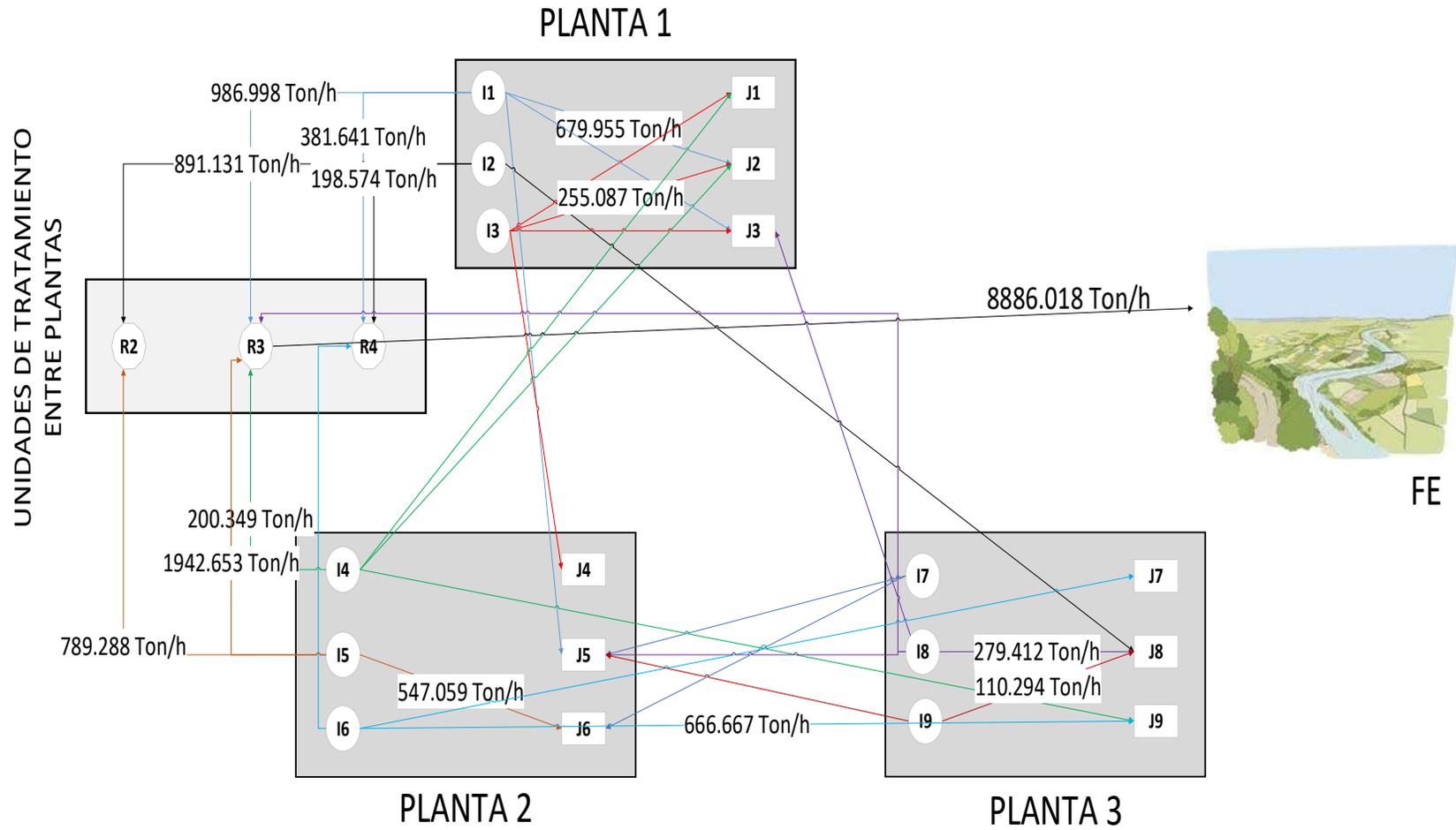
Figura 6 Configuración de eco-parque industrial minimizando TAC2.

### 3.2.3 Minimizando costo total anual para el usuario 3 (TAC3)

La minimización del TAC3 da como resultado un costo total anual de \$1, 507,100 por cada año para el usuario 3, sin embargo para el usuario 1 se obtiene el máximo valor de costo total anual siendo de \$1, 967,500 por cada año, con un consumo de agua fresca de dentro del eco-parque de 8886.02 ton/h y con un costo total anual global de \$5, 250,600.

**Tabla 5** Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando TAC3.

FUENTE-SUMIDERO		FLUJO Tn/h	FUENTE-INTERCEPTORES	FLUJO Tn/h	
1	2	679.955	1	3	986.998
	3	790.666		4	381.641
	5	60.74		2	891.131
2	8	1360.294	2	4	198.574
3	1	1533.654	4	3	200.349
	2	255.087	5	2	789.288
	3	3613.009	3	3	1942.653
	4	2681.025	6	4	633.333
4	1	548.397	8	3	1062.049
	2	17.92	<b>TUBERIAS Y FLUJOS EXISTENTES DENTRO DEL ECO-PARQUE INDUSTRIAL MINIMIZANDO PLANTA 3</b>		
	9	1333.333			
5	6	547.059			
6	7	1800			
	9	666.667			
7	5	614.706			
	6	1185.294			
8	3	211.789			
	5	196.75			
	8	279.412			
9	5	1889.706	<b>INTERCEPTARIOS-DESCARGA</b>	<b>FLUJO Tn/h</b>	
	8	110.294	3	8886.018	



**Figura 7** Configuración de eco-parque industrial minimizando TAC3.

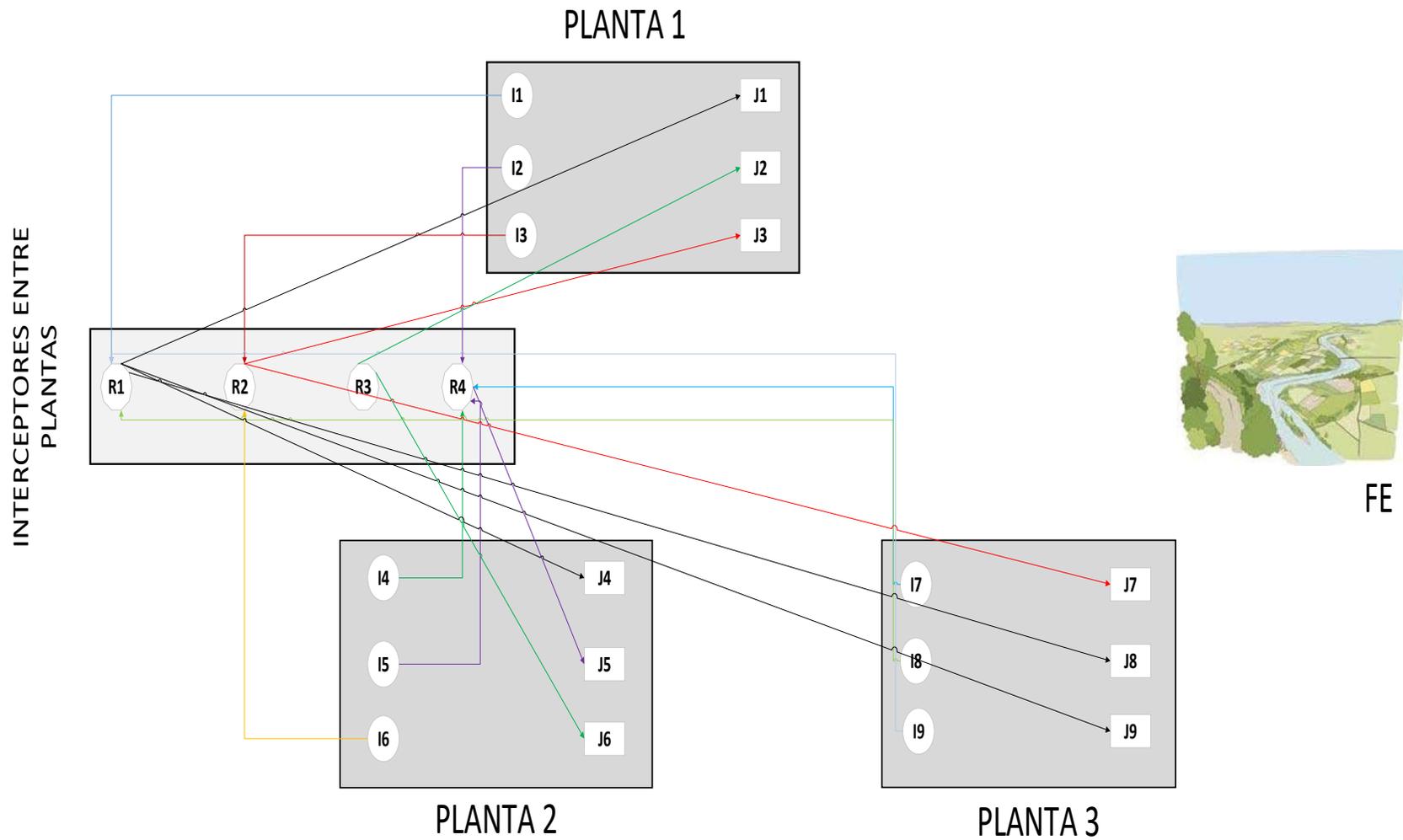
### 3.2.4 Minimizando consumo de agua para los usuarios del eco-parque industrial (EPI)

Al minimizar el consumo de agua para todos los usuarios del EPI obtenemos valores más altos en los  $TAC_{SP}$  de cada participante, esto es debido a que habrá un mayor costo de regeneración de agua dulce por lo cual esto repercute en el costo total anual de los usuarios, donde el  $TAC_{SP}$  más elevado es en el usuario 2 siendo de \$7623700, el menor costo para el usuario 1 con \$7734100, el costo total anual dentro del EPI de \$22, 778,100 para cada año.

**Tabla 6** Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando para el consumo de agua.

FUENTE-INTERCEPTORES		FLUJO Tn/h	INTERCEPTORES-SUMIDEROS	FLUJO Tn/h	
1	3	2900	1	1	2900
2	4	2450		4	3900
3	2	8083		8	1750
4	4	3900		9	2000
5	4	3279	2	3	8083
6	2	3100		7	1800
7	4	1800	3	2	2450
8	1	1750		6	3100
9	1	2000	4	5	3279

En la minimización del consumo de agua para el EPI, se puede observar en la **Figura 8** no existe una descarga de agua dulce al medio ambiente esto es debido a que se la configuración que se presenta para el EPI, da mayor prioridad a reúso y reciclaje de agua fresca por tal motivo no solo el costo de regeneración ( $RCP_{SP}$ ) aumento, si no a su vez existe el aumento dentro del costo de tuberías entre las plantas de eco-parque industrial.



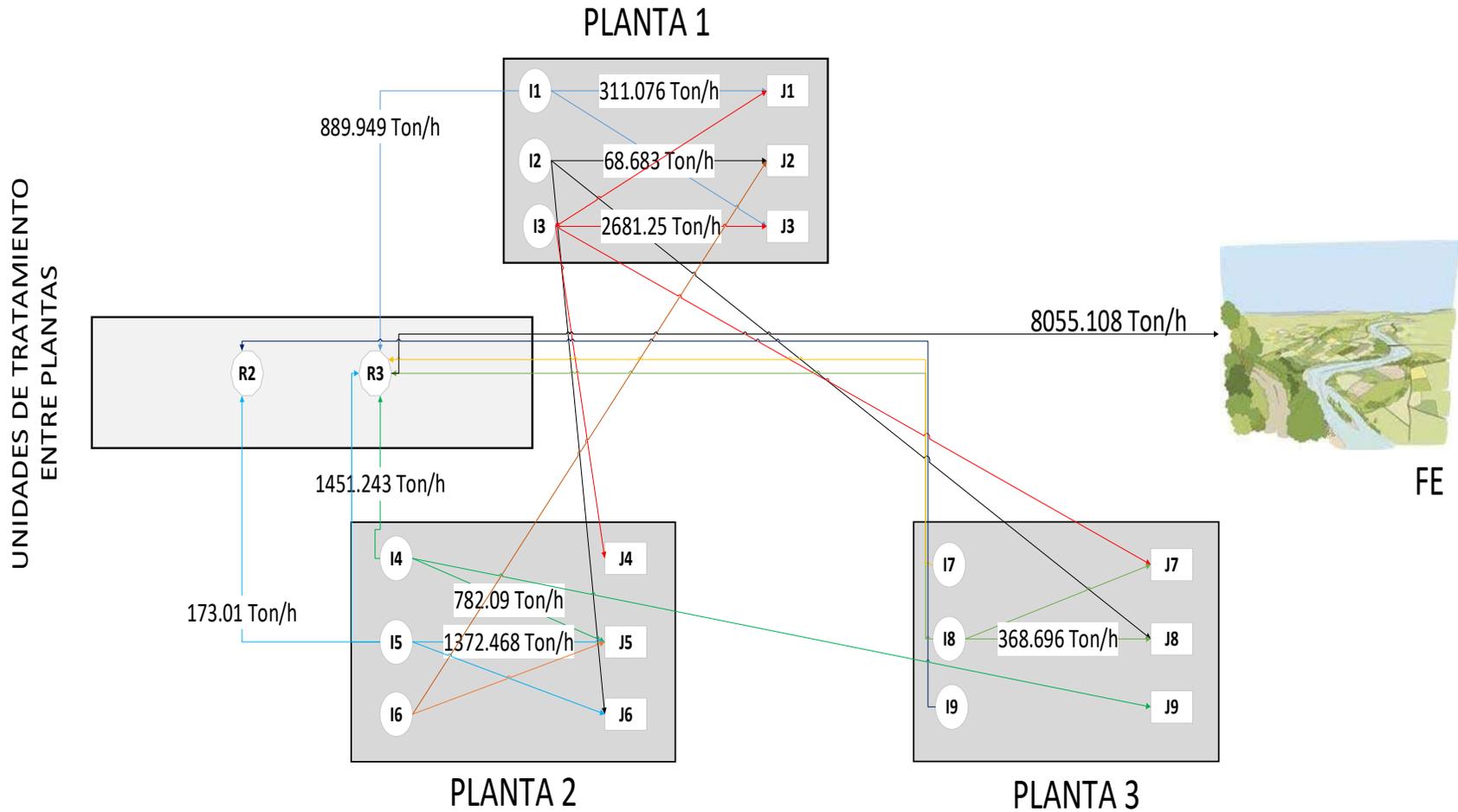
**Figura 8** Configuración de eco-parque industrial minimizando el consumo de agua.

### 3.2.5 Minimizando la solución compromiso (CS)

Al minimizar la solución compromiso para los usuarios del eco-parque industrial los TAC<sub>SP</sub> que se obtienen son los costos más altos obtenidos, esto debido a que los costos de agua, el costo de regeneración y el costo de tubería se ven afectados de manera directa y por lo tanto el costo total anual para cada usuario aumenta. Siendo el usuario 1 el que representa el mayor costo con \$16,003,000 por cada año y el menor costo para el usuario 3 con un costo anual de \$15,361,000, y con TAC global dentro del eco-parque de \$47,112,000 siendo este el mayor costo total anual global en todas las posibles configuraciones del EPI.

**Tabla 7** Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando la solución compromiso.

FUENTE-SUMIDERO		FLUJO Tn/h	FUENTE-INTERCEPTORES		FLUJO Tn/h	
1	1	311.076	1	3	889.949	
	3	1698.975	4	3	1451.243	
2	2	68.683	5	2	173.01	
	6	1046.753		3	429.107	
	8	1334.564	7	3	1800	
3	1	1647.853	8	3	1311.799	
	3	3063.303	9	2	2000	
	4	2681.25	<b>TUBERIAS Y FLUJOS EXISTENTES DENTRO DEL ECO-PARQUE INDUSTRIAL MINIMIZANDO LA SOLUCION COMPROMISO</b>			
7	690.594					
5	782.09					
4	9	1666.667				
	5	1372.468				
5	6	1304.416				
	2	2381.317				
6	5	718.683				
	7	69.505				<b>INTERCEPTORES-DESCARGA</b>
8	8	368.696				3



**Figura 9** Configuración de eco-parque industrial minimizando la solución compromiso.

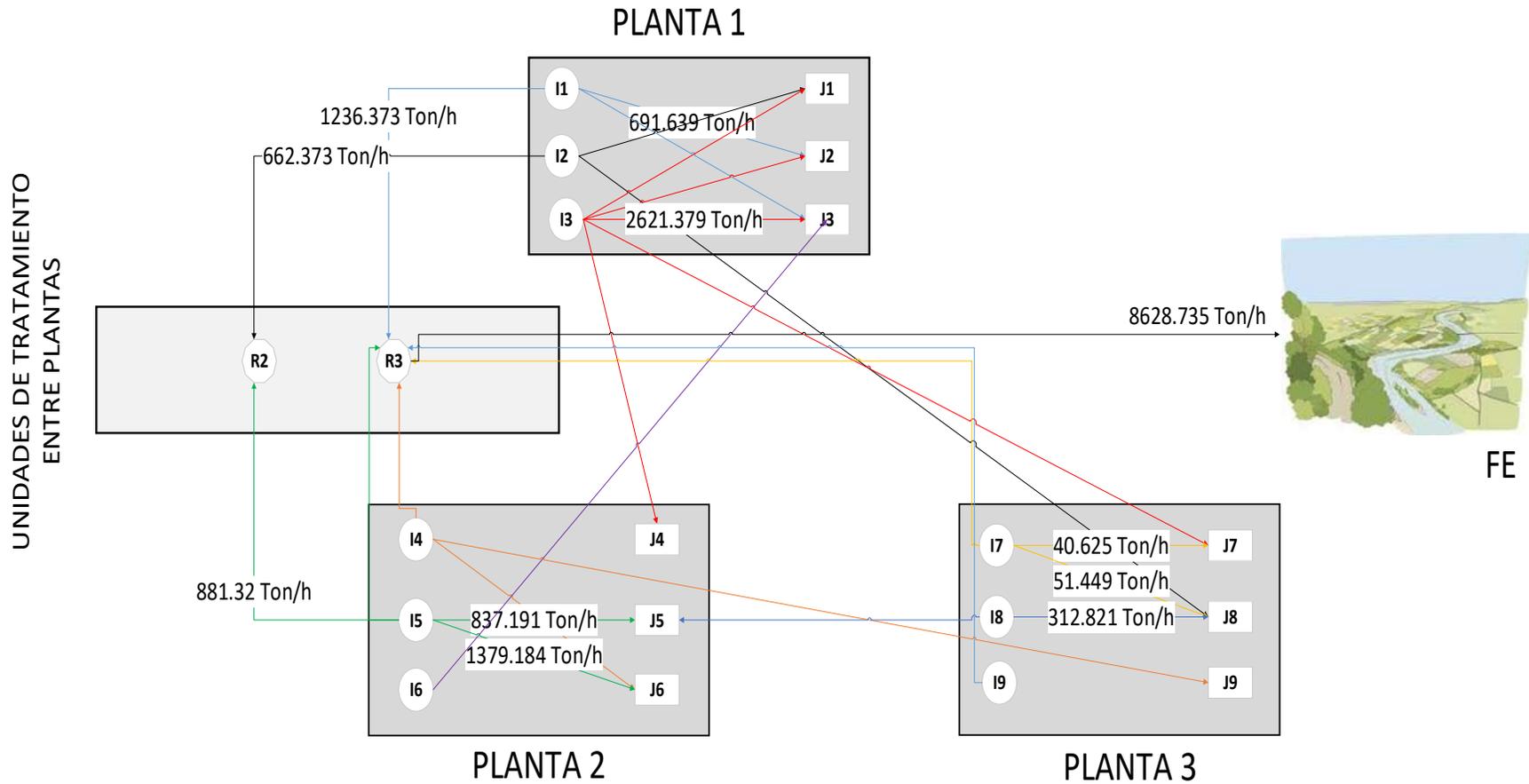
### 3.2.6 Minimizando el TAC total

Minimizando el consumo total anual del eco-parque industrial hace que los costos individuales ( $TAC_{SP}$ ) sea menores a los generados para la solución compromiso , dando un costo para el usuario 1 de \$1,745,100, para el usuario 2 de \$1,765,700 y para el usuario 3 de \$1,600,400, generando un costo total anual para todo el eco-parque de \$5,111,200, siendo así el menor costo global para el EPI para todas las posibles configuraciones propuestas anteriormente.

**Tabla 8** Tabla de tuberías existentes y flujos minimizando el TAC total del EPI.

FUENTE-SUMIDERO		FLUJO Tn/h	FUENTE-INTERCEPTORES		FLUJO Tn/h
1	2	691.639	1	3	1236.373
	3	971.988	2	2	662.373
2	1	401.643	4	3	1959.184
	8	1385.73	5	2	881.32
3	1	1803.991		3	181.305
	2	257.631	7	3	1707.926
	3	2621.379	9	3	2000
	4	2681.25	<b>TUBERIAS Y FLUJOS EXISTENTES DENTRO DEL ECO-PARQUE INDUSTRIAL MINNIMIZANDO TAC TOTAL</b>		
	7	718.75			
4	6	274.15			
	9	1666.667			
5	5	837.191			
	6	1379.184			
6	3	3100			
	7	40.625			
7	8	51.449			
	5	1437.179			
8	8	312.821	<b>INTERCEPTORES-DESCARGA</b>		<b>FLUJO Tn/h</b>
			3		8628.735

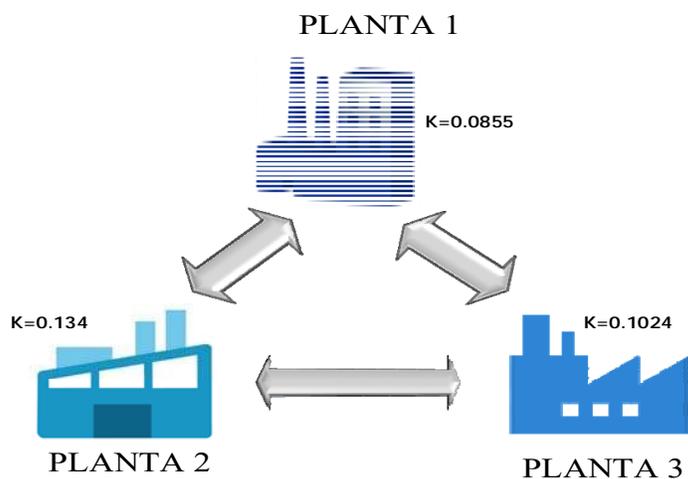
El consumo de agua para la minimización del TAC total del EPI es de 8602.159 ton/h, siendo el menor costo total anual para las minimizaciones de los  $TAC_{SP}$ .



**Figura 10** Configuración de eco-parque industrial minimizando el TAC total del EPI.

### 3.2.7 Multi-Stake Holder

Para los tomadores de decisiones, se lleva a cabo la generación de diferentes pesos en MATLAB, los cuales estarán dando una prioridad a cada uno de los usuarios involucrados dentro de eco-parque industrial, esto a su vez determinara el nivel de insatisfacción que tendrá cada usuario al dar prioridad a uno de los tres usuarios del EPI y los costos totales anuales para cada empresa que son generados. La **Figura 11** representara la prioridad que se da a una empresa.



**Figura 11.** Pesos asignados diferentes usuarios.

La **Tabla 9** muestra los diferentes pesos que fueron generados para cada uno de los usuarios y los cuales son aplicados a los tomadores de decisiones. [Revisar las distribución de pesos](#)

**Tabla 9** Tabla de pesos generados en MATLAB.

ESCENARIOS(K)	PLANTA 1	PLANTA 2	PLANTA 3
1	0.0855	0.1340	0.1024
2	0.0396	0.1453	0.1130
3	0.0396	0.1521	0.0955
4	0.0828	0.1607	0.1058
5	0.2521	0.0265	0.1701
6	0.2184	0.0335	0.1509
7	0.0397	0.2397	0.0786
8	0.0749	0.3244	0.0560
9	0.1665	0.0225	0.1931
10	0.1584	0.0540	0.2013

Para cada uno los pesos que fueron generados en relación a cada usuario, es decir, la prioridad que se da para cada empresa dentro del EPI, se obtiene un porcentaje de insatisfacción para los diferentes participantes, el cual nos ayudara a obtener la solución óptima para cada participante en la que los diferentes usuarios tengan el menor costo total anual. El porcentaje de insatisfacción para cada usuario es obtenido a través de tomar el TAC que se generó con el peso o la prioridad que se le asignó a la empresa, menos el menor costo total anual obtenido para ese usuario ( $TAC^{LOW}$ ), entre el mayor costo total anual generado para la empresa ( $TAC^{UP}$ ), menos nuevamente el ( $TAC^{LOW}$ ) del participante. Esto se puede apreciar de manera más sencilla en las Ecuaciones 22, 23 y 24. El porcentaje de insatisfacción se obtendrá a través de la suma de cada porcentaje de insatisfacción de los tres usuarios (ver **Tabla 10**).

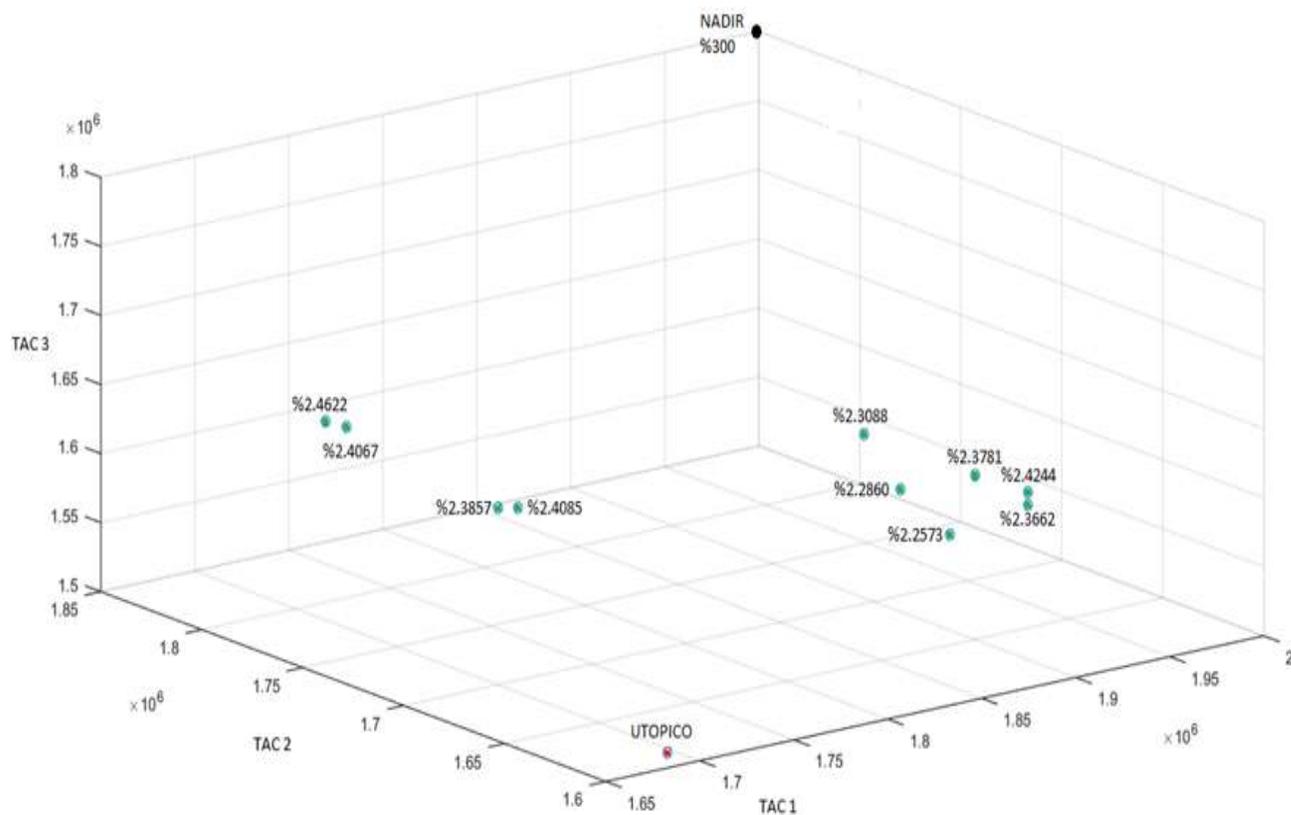
**Tabla 10** Tabla de porcentajes de insatisfacción.

K	TAC1 \$US	%DES	TAC2 \$US	%DES	TAC3 \$US	%DES	FRESHWATER t/h	TAC TOTAL \$US	% TOTAL
1	1,853,400	1.15	1,643,200	0.27	1,626,700	0.86	8628.875	5,123,300	2.29
2	1,890,000	1.41	1,653,200	0.34	1,577,500	0.51	8631.257	5,120,800	2.26
3	1,899,800	1.48	1,623,300	0.13	1,612,400	0.76	8628.875	5,135,500	2.37
4	1,870,900	1.28	1,622,600	0.12	1,642,700	0.98	8628.875	5,136,200	2.38
5	1,716,000	0.19	1,800,300	1.38	1,630,200	0.89	8629.797	5,146,500	2.46
6	1,716,200	0.19	1,789,900	1.31	1,632,500	0.91	8617.882	5,133,300	2.41
7	1,898,600	1.47	1,622,100	0.12	1,622,800	0.84	8629.236	5,143,500	2.42
8	1,811,800	0.86	1,622,600	0.12	1,690,300	1.32	8628.875	5,124,800	2.31
9	1,798,900	0.77	1,791,800	1.32	1,547,700	0.29	8629.049	5,138,300	2.39
10	1,805,500	0.82	1,788,400	1.30	1,547,800	0.29	8628.996	5,141,700	2.41

Como se puede apreciar en la **Tabla 10**, los porcentajes de insatisfacción totales están entre 2.25 y 2.46 %, los porcentajes de insatisfacción obtenidos son representados en un diagrama de Pareto (**Figura 12**) para tener un análisis de resultados más completo.

Siendo el 2.25% el que representa la menor insatisfacción total dentro del EPI, siendo este el punto que se encuentra más cercano al punto de utopía. Este es el mejor escenario obtenido para las tres empresas y a su vez es el punto que se encuentra a mayor distancia de nuestro punto NADIR, el cual representa nuestra peor opción obtenida para los tres usuarios, por tal motivo este punto representa un nivel alto de satisfacción respecto a los diferentes usuarios dentro del eco-parque industrial.

La **Figura 13** representa la superestructura que se obtiene tomando en cuenta el resultado de la menor insatisfacción total dentro del EPI, la cual toma en cuenta todas las actividades que son llevadas a cabo dentro del eco-parque, así como el uso y reúso de agua.



**Figura 12.** Diagrama de PARETO.

Los costos asociados para el menor punto de insatisfacción son de US\$1, 890,000 costo total anual para el usuario 1, US\$1, 653,200 costo total anual para el usuario 2, US\$1, 577,500 costo total anual para el usuario 3 y con consumo de agua fresca de 8631 ton/h.

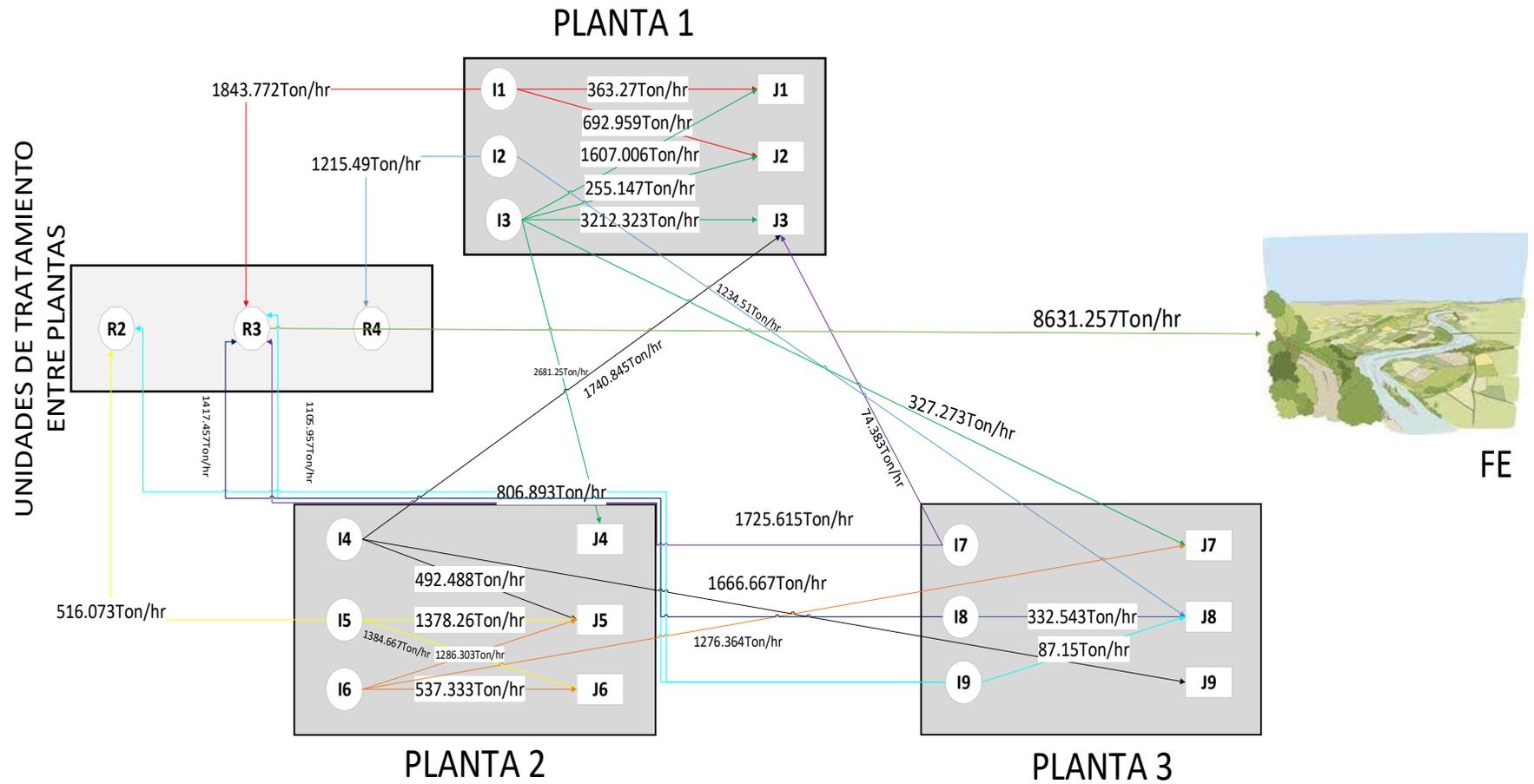


Figura 13. Configuración del eco-parque industrial con el menor porcentaje de insatisfacción total.

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un estudio que considera la aceptabilidad en la síntesis óptima de redes de agua en parques eco-industriales, el estudio involucra todas las posibles configuraciones que pueden existir ofreciendo diferentes alternativas para la selección económica y ambientalmente óptima factible. La formulación matemática propuesta representa todas las actividades consideradas en la red global de distribución de agua, atendiendo la disminución de los costos totales anuales relacionados a los participantes del eco-parque industrial. Particularmente, el análisis presentado muestra que es posible satisfacer los requerimientos de agua para cada planta al menor costo por año.

Los resultados muestran que es posible acercarse al punto utópico con la metodología propuesta. Específicamente la solución que contempla la minimización global del costo total anual (tradicionalmente implementada en anteriores trabajos), usualmente conduce a soluciones lejanas del punto utópico, ya que las industrias de mayor tamaño son las que determinan la solución final. Lo anterior afecta la aceptabilidad de las industrias pequeñas y finalmente la posibilidad de implementar el parque eco-industria. **Porque eles afecta , En las conclusiones debe incluir un análisis directo y/o numerico de los resultados, es decir la solución XX muestra que es posible reducir los costs XX**

## 5. REFERENCIAS

**A.J.D Lambert y F.A. Boons., (2002)**, “Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks”, *Technovation*. 22, 471-484.

**Aviso KB, Tan RR, Culaba AB., (2010)**, “Designing eco-industrial water exchange networks using fuzzy mathematical programming”. *Clean Technol Environ Policy*. 12, 353–363.

**Bagajewicz M., (2000)**, “A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants”. *Comput Chem Eng*. 24, 2093–2113.

**Bandyopadhyay S, Sahu GC, Foo DCY, Tan RR., (2010)**; “Segregated targeting for multiple resource networks using decomposition algorithm”. *AIChE J*. 56, 1235–1248.

**Brooke A., Kendrick D., Meeraus A., Raman R., (2017)**, “GAMS, A user’s guide”. GAMS Development Corporation, Washington.

**Cheng Seong Khor, Dominic C. Y. Foo, Mahmoud M. El-Halwagi, Raymond R. Tan, y Nilay Shah., (2011)**, “A Superstructure Optimization Approach for Membrane Separation-Based Water Regeneration Network Synthesis with Detailed Nonlinear Mechanistic Reverse Osmosis Model”. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 50 (23), 13444–13456

**Chew IML, Foo DCY, Tan RR., (2010)**, “Flowrate targeting for interplant resource conservation network. Part 2: unassisted integration scheme”. *Ind Eng Chem Res*. 49, 6456–6468.

**Chew IML, Foo DCY, Ng DKS., (2007)**, “Targeting for plant-wide water integration”. In: *Joint Symposium for Chemical and Metallurgical Engineering*, Pretoria, South Africa.

**Chew IML, Foo DCY, Ng DKS, Tan RR., (2010)**, “Flowrate targeting for interplant resource conservation network. Part 1: unassisted integration scheme”. *Ind Eng Chem Res.* 49, 6439–6455.

**Chew IML, Tan R., Ng DKS, Foo DCY, Majozi T, Gouws J., (2008)**, Synthesis of direct and indirect interplant water network. *Ind Eng Chem Res.* 47, 9485–9496.

**Diwekar, U. M., (2008)**, “Introduction to Applied Optimization”. Carnegie Mellon University, Pittsburgh: Springer.

**Dowling, A. W, Ruiz-Mercado, G, Zavala, V. M., (2016)** “A framework for multi-stakeholder decision-making and conflict resolution”. *Comput. Chem. Eng.* 90, 136–150.

**Dunn RF y El-Halwagi M. M., (2003)**, “Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry”. *Chem Technol Biotechnol.*, 78, 1011–1021.

**El-Halwagi, M. M., (2006)**, “Process Integration: New York: Academic Pres”.

**El-Halwagi M. M., (2017)**, “Sustainable design through process integration: Fundamentals and applications to industrial pollution prevention, resource conservation, and profitability enhancement”. Second Edition, Elsevier, New York, USA

**Eva M. Lovelady y Mahmoud M. El-Halwagi., (2009)**, “Design and integration of eco-industrial parks for managing water resources”. *Environmental Progress & Sustainable Energy.* 28, 265-272

**Foo DCY., (2008)**, “Flowrate targeting for threshold problems and plant-wide integration for water network synthesis”. *J Environ Manage.* 88, 253–274.

**Foo DCY., (2009)**, “State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis”. *Ind Eng Chem Res.*, 48, 5125–5159.

**Garcia-Montoya M., Sengupta D., Nápoles-Rivera F., Ponce-Ortega J. M., y El-Halwagi M. M., (2016)**, “Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex”. *Journal of Cleaner Production* 130: 82-91.

**John Ehrenfeld y Nicholas Gertler., (1997)**, “Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg”. *Journal of Industry Ecology*. 1, 67-79

**Kim JK, Smith R., (2004)**, Automated design of discontinuous water systems. *Trans Inst Chem Eng*. 82, 238–248.

**Lamber A.J.D, Bons F.A. (2002)** “Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks”. *Technovation*. 22, 471-484.

**Liao ZW, Wu JT, Jiang BB, Wang JD, Yang YR., (2007)**, “Design methodology for flexible multiple plant water networks”. *Ind Eng Chem Res*. 46, 4954–4963.

**Marianne Boix, Ludovic Montastruc, Luc Pibouleau, Catherine Azzaro-Pantel, y Serge Domenech., (2012)**, “Industrial water management by multiobjective optimization: from individual to collective solution through eco-industrial parks”, *Journal of Cleaner Production*. 22, 85-97.

**Marianne Boix, Ludovic Montastruc, Luc Pibouleau, Catherine Azzaro-Pantel, y Serge Domenech.,(2015)**, “Optimization methods applied to the design of eco-industrial parks: a literature review”, *Journal of Cleaner Production*. 87, 303-317.

**Ng DKS, Foo DCY, Rabie A, El-Halwagi M. M., (2008)**, “Simultaneous synthesis of property-based water reuse/recycle and interception networks for batch processes”. *AIChE J*. 54, 2634–2632.

**Noel Brings Jacobsen., (2008)**, “Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects”. *Journal of Industry Ecology*. 10, 239-255

**Olesen SG, Polley GT., (1996)**, “Dealing with plant geography and piping constraints in water network design”. *Trans Inst Chem Eng*.74, 273–276.

**Ponce-Ortega JM, Hortua AC, El-Halwagi M. M, Jimenez-Gutierrez A., (2009),** “A property-based optimization of direct recycle networks and wastewater treatment processes”. *AIChE J.* 55, 2329–2344.

**Ponce-Ortega JM, El-Halwagi MM, Jimenez-Gutierrez A., (2010),** “Global optimization of property-based recycle and reuse networks including environmental constraints”. *Comput Chem Eng.* 34, 318–330.

**Qi Zhang, NilayShah, John Wassick, Rich Helling y Petervan Egerschot., (2014),** “Process integration technology review: background and applications in the chemical process industry”, *Computers & Industrial Engineering.* 74, 68-83

**Rubio-Castro E., Ponce-Ortega J. M., Cervantes-Gaxiola M. E., Hernández-Calderón O. M., Ortiz-del-Castillo J. R., Milán-Carrillo J., y Meza-Contreras J. A., (2016),** “Optimal design of integrated agricultural water networks”. *Computers and Chemical Engineering* 84: 63-82.

**Rubio-Castro E, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi M. M., (2012),** “Optimal reconfiguration of multi-plant water networks into an eco-industrial park”. *Computers & Chemical Engineering.* 44,58-83

**Rubio-Castro E, Ponce-Ortega JM, Serna-González M, El-Halwagi M. M, Pham V., (2013),** “Global optimization in property-based interplant water integration. *AIChE J,* 59 813–833

**Spriggs D, Lowe E, Watz J, El-Halwagi M. M, Lovelady EM., (2004.),** Design and development of eco-industrial parks. In: *AIChE Spring Meeting, New Orleans, LA.*

**Y.P,Wang., (1994),** “Wastewater minimization”. *Chemical Engineering Science.* 981-1006.