



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA  
EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES  
CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN  
JUSTA DE LOS RECURSOS**

**T E S I S**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA :**

**DANIELA JACQUELINE CRUZ AVILÉS**

**ASESOR:**

**DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA**

**MORELIA, MICH.**

**AGOSTO 2020**

## **AGRADECIMIENTOS**

## RESUMEN

### DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

Por: Daniela Jacqueline Cruz Avilés.

Licenciatura en Ingeniería Química

El elevado consumo de agua a nivel industrial, la escasez que ha presentado ésta a lo largo de los años, así como las estrictas restricciones ambientales promueven esfuerzos para minimizar costos de producción y a su vez, minimizar el impacto ambiental. El agua al ser un recurso indispensable para la humanidad, está comprometida en aspectos sociales, ambientales y económicos. La industria química y de procesos es uno de los principales consumidores de agua a nivel mundial, por eso proponer estrategias que permitan disminuir el consumo de dicho recurso es fundamental para tener procesos sostenibles.

Si bien, el objetivo de un parque eco-industrial es mejorar el desempeño económico de las empresas participantes mientras se minimiza su impacto ambiental, dentro de este trabajo nos enfocaremos en la integración del agua entre las plantas. La principal contribución de este trabajo es diseñar una estrategia de optimización que permita la síntesis óptima de redes de agua en parques eco-industriales considerando la distribución justa de los recursos a través de las plantas consideradas.

Este trabajo presenta un modelo de optimización donde se busca la repartición justa de bienes en un parque eco-industrial, donde se considera reúso y reutilización del agua mediante el tratamiento de esta a través de interceptores de propiedad. El costo de cada planta considerará el tratamiento, los costos de tubería y bombeo, y el costo de las fuentes frescas requeridas. Se involucrarán modelos matemáticos que permitan la mejor distribución de los recursos en un esquema de escasez.

**Palabras clave:** Optimización, parque eco-industrial, integración de propiedad, esquemas de justicia, escasez de agua.

Dirigida por: **Dr. José María Ponce Ortega.**

## ABSTRACT

### OPTIMAL DESIGN OF WATER NETWORKS IN ECO-INDUSTRIAL PARKS CONSIDERING THE FAIR DISTRIBUTION OF RESOURCES

By: Daniela Jacqueline Cruz Avilés

Bachelor in Chemical Engineering

The high consumption of water at an industrial level, the scarcity that it presents over the years, as well as the strict environmental restrictions promote efforts to minimize production costs and, in turn, minimize the environmental impact. Water, being an indispensable resource for humanity, is compromised in social, environmental and economic aspects. The chemical and process industry is one of the main consumers of water worldwide, so proposing strategies that allow reducing the consumption of this resource is essential to have sustainable processes.

Although, the objective of an eco-industrial park is to improve the economic performance of the participating companies while minimizing their environmental impact, within this work we will focus on the integration of water between industrial plants. The main contribution of this work is to propose an optimization strategy that allows the optimal synthesis of water networks in eco-industrial parks considering the fair distribution of resources through the considered plants.

This work presents an optimization model where the fair distribution of water in an eco-industrial park is considered, where recycling and reusing of water are considered by treating it through property interceptors. The cost of each plant will consider treatment, piping and pumping costs, and the cost of required fresh sources. Mathematical models will be involved that allow the best distribution of resources in a scarcity scheme.

**Keywords:** Optimization, Eco-industrial park, property integration, justice schemes, water scarcity.

Supervised by: Dr. José María Ponce Ortega.

## ÍNDICE GENERAL

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>I</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>IV</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>VI</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>VII</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. PRESENTACIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	5
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	8
1.4. OBJETIVOS .....	8
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	8
1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES .....	8
1.5. HIPÓTESIS .....	9
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>10</b>
OPTIMIZACIÓN.....	10
PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA.....	10
HERRAMIENTA DE GAMS .....	11
PARQUES ECO INDUSTRIALES.....	11
REDES DE AGUA .....	13
INTEGRACIÓN DE PROPIEDAD .....	14
ESQUEMAS DE JUSTICIA .....	14

<b>3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>15</b>
3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
3.2. FORMULACIÓN DEL MODELO .....	15
3.3. CASOS DE ESTUDIO .....	22
CASO DE ESTUDIO 1 .....	22
CASO DE ESTUDIO 2 .....	23
CASO DE ESTUDIO 3 .....	24
<b>4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>25</b>
<b>5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>40</b>
<b>6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>42</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>47</b>
CÓDIGO DE GAMS .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de un parque eco-industrial. ....	2
Figura 2. Plantas ordenadas por tamaño. ....	3
Figura 3. Representación de un parque eco-industrial con diferentes objetivos de solución. ....	4
Figura 4. La simbiosis industrial de Kalundborg en Dinamarca (en 2002). Fuente: The Center for Industrial Symbiosis, Kalundborg (Hansen, 2003). ....	12
Figura 5. Simbiosis Industrial del flujo de agua en Kalundborg (m <sup>3</sup> /año) en 2002. Fuente: Green Accounts from Kalundborg Center for Industrial Symbiosis (Hansen, 2004). El estudio de SFA (Análisis de Flujo de Sustancia) del agua. ....	13
Figura 6. Superestructura propuesta. ....	16
Figura 7. Comparación entre plantas (caso 1). ....	25
Figura 8. Costo de cada planta acorde a la función objetivo. ....	28
Figura 9. Diagrama radial del Caso1. ....	28
<i>Figura 10. Configuración óptima para el escenario A con integración entre plantas. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 11. Configuración óptima para el escenario B con integración entre plantas. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 12. Configuración óptima para el escenario C con integración entre plantas. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13. Configuración óptima para el escenario D con integración entre plantas. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 14. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar social del Caso 2. Todos los flujos tienen unidades de kg/h. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Rawlsian del Caso 2. Todos los flujos tienen unidades de kg/h, ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Nash del Caso 2. Todos los flujos tienen unidades de kg/h. La fuente fresca se reparte en partes iguales a las plantas 7,8 y 9. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17. Representación de los costos bajo los distintos esquemas del Caso 2. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 18. Diagrama radial del Caso2. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 19. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Nash del Caso 3. Todos los flujos tienen unidades de kg/h. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Rawlsian del Caso 3. Todos los flujos tienen unidades de kg/h. ....</i>	<i>37</i>

*Figura 21. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar social del Caso 3. Todos los flujos tienen unidades de kg/h, las fuentes frescas de lado derecho son divididas en partes iguales, siendo 0.08 y 0.066 kg/h para las fuentes frescas 1 y 2 respectivamente. ....* 38

*Figura 22. Representación de los costos bajo los distintos esquemas (caso 3). ....* 39

*Figura 23. Diagrama radial del caso 3. ....* 39

## **ÍNDICE DE TABLAS**

*Tabla 1. Requerimiento de agua por planta. ....* 4

*Tabla 2. Propiedades de las fuentes frescas y de proceso del caso 1. ....* 22

*Tabla 3. Restricciones de las corrientes de proceso y agua de desecho del caso 1. ....* 22

*Tabla 4. Propiedades de las fuentes frescas y de proceso del caso 2. ....* 23

*Tabla 5. Restricciones de las corrientes de proceso y agua de desecho del caso 2. ....* 23

*Tabla 6. Propiedades de las fuentes frescas y de proceso del caso 3. ....* 24

*Tabla 7. Restricciones de las corrientes de proceso y agua de desecho del caso 2. ....* 24

*Tabla 8. Costos por planta y totales bajo diferentes funciones objetivo en los distintos escenarios. ....* 27

*Tabla 9. Comparación de costos entre cada una de las funciones objetivo del Caso 2. ....* 35

*Tabla 10. Costos por planta y totales bajo diferentes funciones objetivo. ....* 38

## **NOMENCLATURA**

### **Índices**

i	fuentes de proceso
$i_{pp}$	process source from plant pp
j	process sink
$j_{pp}$	sink at plant pp
p	propiedad
r	fuentes frescas

### **Acrónimos (superíndices)**

Env	ambiental
In	entrada
$int^n$	interceptor para la propiedad n
LO	valor inferior
max	máximo
min	mínimo
Out	salida
PIN	red interceptora de propiedad
Sink	corriente
Source	fuelle
UP	valor superior
waste	residuos vertidos al medio ambiente

### **Parámetros**

$\alpha_p^{int^1, \dots, int^N}$	eficiencia del interceptor de propiedad para la propiedad p
$\psi_p$	operador de propiedad para la regla de mezcla para la propiedad p
$\rho$	densidad
$\mu$	viscosidad
AER	proceso de aireación
$B_p$	linealización para los términos bilineales
C	concentración (ppm)

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

COD	demanda química de oxígeno
Color	propiedad de color
$Cost^{Fresh}$	costo unitario de los servicios frescos
$Cost_p^{int^N}$	costo unitario del interceptor N
$F_r$	flujo total para fuente fresca r
$G_j$	caudal total para el sumidero del proceso j
$H_Y$	tiempo de operación de la planta, h/año
MW	peso molecular
NEU	proceso de neutralización
Odor	propiedad de olor
pH	potencial de hidrógeno
R	resistividad eléctrica
$R_\infty$	reflectancia del papel
REC	recuperación de un componente peligroso
RVP	presión de vapor Raid
Tox	toxicidad
$UC_{r,int^1, \dots, int^N}^{Fresh-Sink}$	costo unitario de tuberías y bombeo de fuentes frescas a corrientes de proceso.
$UC_r^{FreshWater}$	costo unitario de agua fresca
$UC_{i,j,int^1, \dots, int^N}^{Int-Sink}$	costo unitario de tuberías y bombeo desde interceptores hasta corrientes de proceso.
$UC_{i,int^1, \dots, int^N}^{Pipe-Source}$	costo unitario de las tuberías y el bombeo de las fuentes a los interceptores.
$UC_{i,j,int^1, \dots, int^N}^{Treatment}$	costo unitario de tratamiento
$x$	contribución fraccional (masa / volumen)
$Y$	respuesta letal
$z$	composición o concentración

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

**Variables**

$CostMayor$	costo anual total por planta bajo el enfoque de bienestar de Rawlsian
$CostNash$	suma de los logaritmos de los costos anuales totales
$FreshWaterCost_j$	costo total del agua fresca
$f_{r,j}$	flujo segregado de la fuente fresca $r$ a la corriente $j$
$g_{i,j}^{int^1, \dots, int^N}$	flujo segregado de interceptores, $int^1, \dots, int^N$ al receptor de proceso $j$ para la fuente de proceso $i$
$g_{i,waste}^{int^1, \dots, int^N}$	flujo segregado de interceptores, $int^1, \dots, int^N$ a residuos para la fuente de proceso $i$
$PipeCost_j^{Fresh-Sink}$	costo de tuberías y bombeo desde fuentes frescas hasta corrientes de proceso
$PipeCost_j^{Int-Sink}$	costo de tuberías y bombeo desde los interceptores hasta las corrientes de proceso
$PipeCost_i^{Int-Waste}$	costo de tubería y bombeo desde los interceptores hasta los desechos
$PipeCost_i^{Source-Int}$	costo de tuberías y bombeo desde las fuentes hasta los interceptores
$TAC$	costo anual total
$TotalCost$	costo total de las plantas
$TotalCostPlant_{pp}$	costo total por planta
$TreatmentCosts_j^{Sinks}$	costo de tratamiento
$TreatmentCosts_i^{Waste}$	costo de tratamiento de los residuos
$TreatmentIntCosts_i$	costo del tratamiento en interceptores
$w_i^{int^1}$	flujo segregado de la fuente de proceso $i$ al interceptor $int^1$
$w_i^{int^1, \dots, int^N}$	flujo segregado desde la fuente de proceso $i$ a los interceptores $int^1,$ $\dots, int^N$

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

$W_i$  caudal total para las fuentes del proceso  $i$

**Escalares**

$N_{Fresh}$  número total de fuentes frescas

$N_{Sinks}$  número total de corrientes de proceso

$N_{Sources}$  número total de fuentes de proceso

waste flujo total de residuos de residuos vertidos al medio ambiente.

**Conjuntos**

$INT^n$  set establecido para el interceptor de propiedades  $n$

NFRESH set establecido para las fuentes frescas,  $\{r|r=1, \dots, N_{Fresh}\}$

NPROP set establecido para las propiedades interceptadas,  $\{p|p=1, \dots, N_{Prop}\}$

NSINKS set establecido para las corrientes de proceso,  $\{j|j=1, \dots, N_{Sinks}\}$

NSOURCES set establecido para las fuentes del proceso,  $\{i|i=1, \dots, N_{Sources}\}$

# **1. PRESENTACIÓN**

## **1.1. INTRODUCCIÓN**

En este proyecto se propone un modelo de optimización que permita la integración del agua en parques eco-industriales (PEI) donde se consigue el reciclaje y reutilización de redes en función de las propiedades, éstas últimas incluyen restricciones tanto para cada industria como ambientales, a su vez, se estarán utilizando diferentes enfoques de optimización. De este modo se considera una reducción del consumo de agua dulce, minimizando las entradas y salidas de fuentes frescas y contaminadas, respectivamente, logrando así una disminución significativa del impacto ambiental.

Los parques eco-industriales (PEI) nos permiten mejorar el desempeño económico de las empresas participantes mientras se minimiza su impacto ambiental. En cuanto al reúso e intercambio de materia, particularmente el agua puede ser muy importante, debido a la escasez de este recurso que se ha presentado tanto a nivel nacional como internacional (sobre todo en regiones altamente áridas con alto desarrollo industrial como lo son el área metropolitana de Monterrey y la Ciudad de Hermosillo).

Cabe resaltar que, en estas zonas, el desarrollo económico, urbano e industrial se ve afectado por la disponibilidad de este recurso, por lo que al mejorar la eficiencia en cuanto a su uso y distribución se proporciona una gran aportación a su productividad.

El sector industrial consume gran cantidad de agua, y en las últimas décadas la disponibilidad de este recurso ha disminuido, incrementando así su costo. La propuesta de cambiar el modelo lineal de uso y desecho del agua por de reúso donde se optimiza el uso del agua y se reducen significativamente las salidas de aguas residuales es una clave para minimizar éste gran consumo, beneficiando económica y ambientalmente.

Muchas industrias tienen corrientes de desecho con diferentes propiedades, que pueden ser requeridas en otra planta y esta otra planta puede requerir agua ligeramente tratada que fue desecho de otra planta. Mediante diferentes etapas de tratamiento se permite regenerar el agua hasta la calidad exigida para el reúso.

Los trabajos anteriores han mostrado la repartición de bienes a través de esquemas de justicia sociales, donde se toma al parque como un todo, sin considerar el valor de cada industria.

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

Se espera que con esta metodología se reduzca el costo total de cada planta que opera en un parque eco-industrial de una manera más justa. Incluyendo a éste costos de tratamiento, costos de tubería y bombeo, y costos de agua dulce. Este trabajo permitirá entonces un sistema de distribución de agua en que las plantas participantes tengan una repartición justa evitando beneficiar más a unas plantas que a otras.

De acuerdo con **Lowe (1997)** un **parque eco-industrial** se define como *una comunidad de empresas manufactureras y de servicios que buscan desempeño ambiental y económico mejorado a través de la colaboración en la gestión de problemas ambientales y de recursos, incluidos energía, agua y materiales*. Al trabajar juntos, la comunidad de empresas busca un beneficio colectivo que sea mayor que la suma de los beneficios individuales que cada empresa obtendría si optimizara solo su desempeño individual.

El objetivo de un parque eco-industrial es mejorar el desempeño económico de las empresas participantes mientras minimizando su impacto ambiental. Los componentes de este enfoque incluyen un diseño nuevo o actualizado de la infraestructura del parque y plantas, prevención de la contaminación, eficiencia energética y asociación entre empresas.

A través de la colaboración, esta comunidad de empresas se convierte en un ecosistema industrial. Un **parque eco-industrial** puede ser representado por la **Figura 1**, en donde las empresas cooperan entre sí mediante el intercambio de recursos, energía, agua o materiales, con la finalidad de tener beneficios económicos y ambientales.

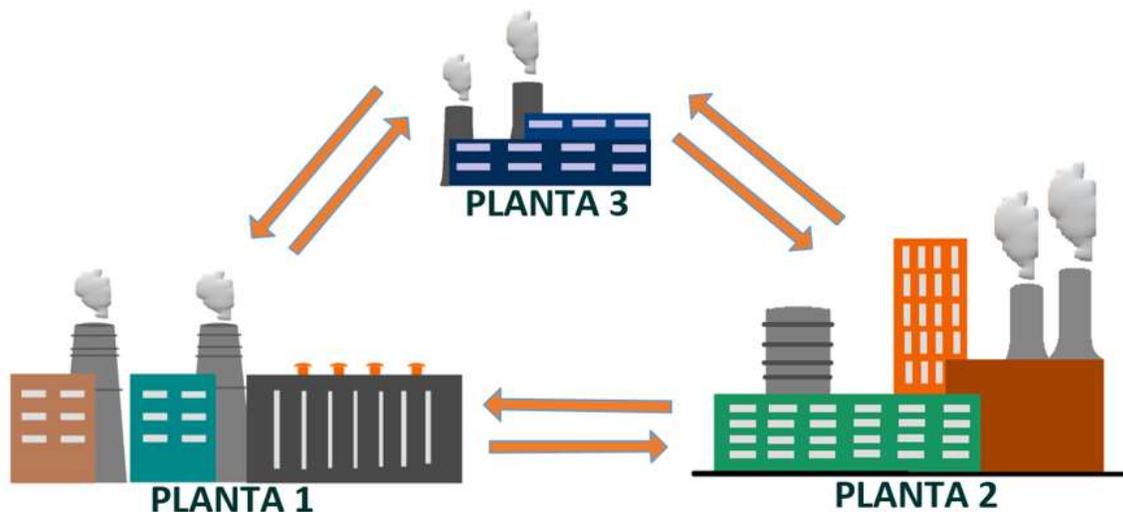


Figura 1. Representación de un parque eco-industrial.

Por ejemplo, en cuanto a recursos, una planta azucarera tiene como producto secundario melaza, la cual puede ser usada como materia prima para una planta de alguna bebida alcohólica. El agua es un recurso común entre las plantas, el agua residual de una planta al llevarse a tratamiento, puede ser utilizada por otra o por esta misma. De esta manera, y como se ha mencionado antes, al estar reutilizando y reciclando el agua, se consumen en menor cantidad recursos frescos y también se disminuye la cantidad de descarga de aguas residuales.

Ahora bien, en cuanto a los enfoques de optimización que se discutirán en el presente proyecto se incluyen “esquema de bienestar social”, “esquema de justicia de Rawlsian” y “esquema de Nash”.

En el **esquema de bienestar social** la asignación de recursos se da maximizando la suma de las utilidades, o bien, minimizando la suma de los gastos. Para aplicaciones de ingeniería resulta entonces la solución óptima del sistema. Donde el principio utilitario de algunos participantes suele reducirse considerablemente para lograr el máximo beneficio del sistema, por lo que se presentan desigualdades importantes entre las diferentes partes interesadas. (Munguía-López et al., 2019).

El **esquema de justicia de Rawlsian** da preferencia a los miembros menos favorecidos. De acuerdo con Rawls, las desigualdades sociales y económicas deben ser arregladas de modo que sean del mayor beneficio para los miembros menos favorecidos de la sociedad, argumentando que la desigualdad es aceptable sólo si es ventajosa para quienes están en peor situación. La asignación de recursos se logra al maximizar el peor de los casos. (Munguía-López et al., 2019).



*Figura 2. Plantas ordenadas por tamaño.*

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

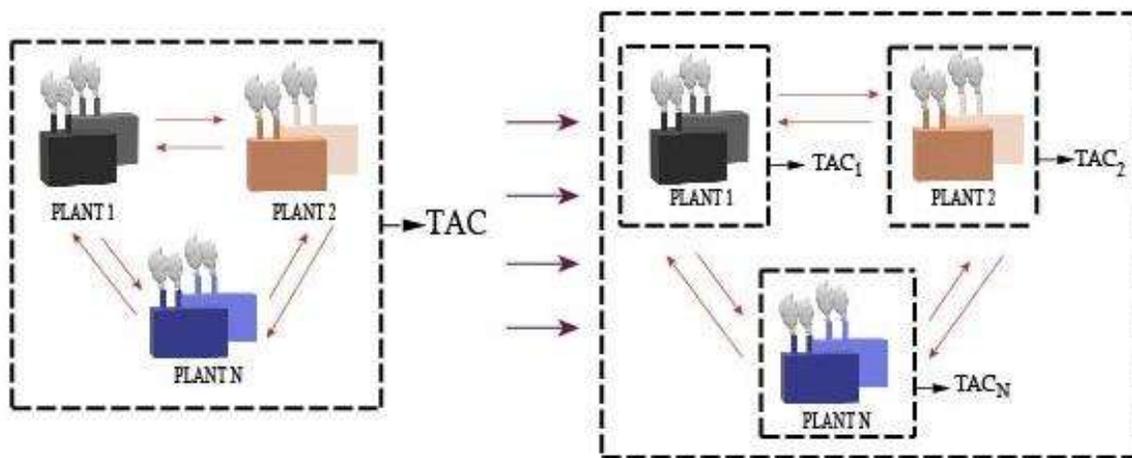
En el **esquema de Nash**, se asigna maximizando la media geométrica de las utilidades, también se puede dar maximizando el producto de las utilidades. La asignación de recursos se obtiene al maximizar la suma de los logaritmos de las utilidades, alcanzando una solución óptima única. De esta manera no se prioriza al miembro más grande o al más pequeño dentro de los participantes. (Munguía-López et al., 2019).

-Para ejemplificar los esquemas se tomará como referencia la **Figura 2**, con los requerimientos por planta mostrados en la Tabla 1.

<i>Planta</i>	<i>Toneladas de agua por hora</i>
<i>Planta 1</i>	1000
<i>Planta 2</i>	700
<i>Planta 3</i>	400

*Tabla 1. Requerimiento de agua por planta.*

Suponiendo que se cuentan con 1,800 toneladas de agua por hora, el enfoque de **bienestar social** cumplirá la demanda de la planta 1, la planta 2, y las toneladas restantes corresponderán a la planta 3. El enfoque de **justicia de Rawlsian** iría en sentido contrario, cumpliendo con la demanda de la planta 3, seguido de la 2, y las toneladas restantes corresponderán a la planta 1. Por último, el **enfoque de Nash**, no dará preferencia a ninguna de las 3, dando, por ejemplo, 850 toneladas a la planta 1, 600 a la planta 2 y 350 toneladas a la planta 3.<sup>1</sup>



*Figura 3. Representación de un parque eco-industrial con diferentes objetivos de solución.*

<sup>1</sup> Valores supuestos para ejemplificar los enfoques.

Los resultados de éste trabajo nos permitirán comparar cada uno de los enfoques, pasando minimizar el bienestar social, que se ha reportado en gran cantidad de trabajos anteriores, a obtener una solución justa para cada participante, como se muestra en la **Figura 3**, donde se pasa de minimizar el costo anual total (TAC) de todos los participantes, a considerar a cada uno de los mismos.

## **1.2. ANTECEDENTES**

Un pilar importante en este proyecto es la integración másica de agua, la cuál será incorporada a parques eco-industriales. Muchas metodologías bajo diferentes enfoques han sido reportadas para la síntesis de redes de agua en parques eco-industriales.

Diferentes estrategias de integración de agua han sido generadas, como son: **Wang et al. (1994)** quienes propusieron calcular el caudal mínimo de agua dulce, mismo que corresponde a la cantidad mínima de agua de desecho mediante una aproximación gráfica, **Dhole et al. (1996)** quienes lograron relacionar la concentración contra el caudal y a su vez relaciones de oferta y demanda para el desarrollo de una representación de fuentes y corriente de proceso mediante una técnica gráfica, **Kuo et al. (1998)**, quienes abordaron las interacciones en el diseño de operaciones de uso de agua y tratamiento de efluentes en industrias de procesos, para así minimizar el uso de este recurso mediante reúso o reciclaje, **Hallale et al. (2002)** desarrollaron una representación de curvas compuestas de la pureza contra el caudal para alcanzar el consumo mínimo de agua. **El-Halwagi et al. (2003)** propusieron un enfoque de focalización gráfica mediante el uso de estrategias de segregación, mezclado, reciclaje y reutilización directa para minimizar el uso de recursos frescos, **El-Halwagi et al. (2004)** propusieron una técnica de integración de propiedades, **Mana et al. (2004)**, entre otros, han presentado estrategias de integración de agua en una planta en los que se logran minimizar los caudales de agua fresca y residual. **Gabriel et al. (2005)** desarrollaron un procedimiento sistemático para la síntesis simultánea de redes de reúso e interceptación de materiales mediante un modelo de programación matemática que permitió eliminar términos no convexos, logrando así la formulación de un modelo de programación lineal, **Karuppiah et al. (2006)** propusieron una formulación de programación mixta entera no lineal para lograr optimizar sistemas integrados de aguas residuales, **Feng et al. (2007)** propusieron un método gráfico para determinar los objetivos para reciclar sistemas de agua

con regeneración de contaminantes, **Ng et al. (2008)** propusieron un enfoque basado en propiedades para desarrollar una técnica para la síntesis de redes de agua con la colocación de dispositivos de intercepción. **Ponce-Ortega et al. (2009)** formularon un modelo matemático de optimización para redes con integraciones de propiedades con tratamiento de aguas residuales dadas regulaciones ambientales, **Ponce-Ortega et al. (2010)** propusieron el reciclaje y reúso de corrientes para la integración másica basadas en propiedades de flujo en lugar de composiciones e incorporando a su vez restricciones ambientales, **Kheireddine et al. (2011)** crearon un enfoque de optimización incorporando simultáneamente concentraciones, propiedades y temperaturas de la corriente y las unidades para el reciclaje del agua. **Sotelo-Pichardo et al. (2014)** presentaron un modelo de programación matemática para la síntesis de redes de agua en base a las propiedades que da cuenta de los cambios en la operación a través de un horizonte temporal con demandas crecientes. **Lu et al. (2017)** desarrollaron un modelo de programación disyuntiva general para abordar problemas de síntesis y operación óptimas de los procesos de tratamiento de aguas residuales considerando estándares de descarga y tasas de penalización.

Ahora bien, con respecto a la integración entre plantas mediante optimización matemática:

**Olesen et al. (1996)** desarrollaron un enfoque de focalización de minimización para redes de agua entre varias plantas industriales, **Lowe et al. (1997)** mostraron el concepto de parque eco-industriales, su importancia en cuanto a beneficios económicos y ambientales, **Ehrenfeld et al. (1997)** Mostraron los beneficios económicos que trae consigo el intercambio de residuos, subproductos y energía logrados en el distrito industrial de Kalundborg, Dinamarca, **Sorin et al. (1999)** propusieron un método algebraico para la minimización de aguas residuales con unidades de intercambio de masa considerando restricciones en la carga transferida y la composición máxima de entrada de impurezas, **Liao et al. (2007)** abordaron un diseño de redes de agua flexible entre múltiples plantas aplicado para operación de caudal fijo y operaciones de contaminantes fijos y únicos, **Ng et al. (2009)** propusieron un modelo lineal para determinar el consumo mínimo de recursos para redes de conservación de recursos de una sola pureza, que incluye una extensión para determinar los objetivos de las redes de conservación de recursos con interceptores, **Lovelady et al. (2009)** desarrollaron un enfoque de optimización para el diseño e integración en parques eco industriales, donde el reciclaje,

reutilización y separación se logra mediante interceptores. **Aviso et al. (2010)** desarrollaron una programación matemática difusa utilizada para identificar la red óptima que satisface los objetivos de las plantas contenidas en el parque eco-industrial. **Chew et al. (2010)** desarrollaron un algoritmo de focalización basado tanto en la concentración como en la propiedad, adaptado en la síntesis de la red de recursos totales entre plantas, **Rubio-Castro et al. (2010)** desarrollaron un modelo de programación matemática con enfoque de discretización para sintetizar redes de agua en parques eco-industriales, **Rubio-Castro et al. (2012)** desarrollaron un modelo MINLP para adaptar redes de agua existentes en la misma zona industrial a modo de diseñar un parque eco-industrial, **Rubio-Castro et al. (2013)** presentaron un enfoque de optimización global para sintetizar redes de agua en un parque eco-industrias utilizando restricciones de propiedad, **López-Díaz et al. (2015)** presentaron un modelo de programación matemática para la síntesis de redes de agua en parques eco-industriales mitigando las descargas industriales en cuencas hidrográficas, considerando su creación, ubicación, tamaño y tareas, **Alnouri et al. (2016)** desarrollaron un enfoque que permite una síntesis de redes de agua en parques eco-industriales identificando el diseño óptimo, **Tiu et al. (2017)** consideraron la calidad del agua para considerar el intercambio de agua en un parque eco-industrial, **Liu et al. (2017)** incorporaron escenarios del parque en cada periodo de tiempo resultando variaciones predecibles para sintetizar un parque eco-industrial. **Leong et al. (2017)** desarrollaron un enfoque integrado para la síntesis de una red óptima de recursos en un parque eco-industrial. **Ibrić et al. (2017)** presentaron una estrategia para la síntesis de redes de agua para problemas no isotérmicos usando un enfoque de programación matemática correspondiente a un modelo MINLP, **Zhang et al. (2018)** desarrollaron un modelo de optimización de redes de agua en parques de acero, **Fadzil et al. (2018)** agregaron una opción de reutilización de agua centralizado que permite cumplir los requisitos mínimos de agua dulce y generación de aguas residuales en parques eco-industriales, **Liu et al. (2018)** incorporaron los efectos térmicos en parques eco-industriales, **Alnouri et al. (2018)** desarrollaron un enfoque en el que se incluyen tuberías en la síntesis de agua de parques eco-industriales, **Aguilar-Oropeza et al. (2019)** desarrollaron un modelo de programación para el reciclaje y reúso de agua en parques eco-industriales en que el objetivo es satisfacer los requerimientos de agua al menor costo para cada una de las plantas participantes, procurando acercarse al punto utópico individual.

Es importante resaltar que todos los trabajos anteriores solamente consideran el beneficio social de todos los integrantes del parque eco-industrial. Es decir, el beneficio individual no es tomado en cuenta. Por lo tanto, dichas redes obtenidas con estrategias anteriores frecuentemente dan prioridad a las industrias más grandes, dejando de lado los intereses particulares de las industrias pequeñas. Sin embargo, sin la integración de las industrias pequeñas, las industrias grandes no podrían obtener los beneficios óptimos sociales. Es por eso que es importante considerar los beneficios individuales y proponer una estrategia que permita la distribución justa de los recursos entre las empresas participantes. Entonces, el principal objetivo de este trabajo es el desarrollar un modelo de programación matemática para el reciclo y reúso de agua en parques eco-industriales con el objetivo de satisfacer los requerimientos de agua al menor costo para cada una de las plantas participantes, dando una repartición justa de los recursos.

### **1.3. JUSTIFICACIÓN**

Hasta ahora todos de los trabajos anteriores que se han desarrollado para el tratamiento, reciclo y reúso de aguas en parques eco-industriales han considerado funciones objetivo sociales, donde se toma en cuenta al parque como un todo, o bien al costo total en conjunto, sin considerar el valor propio de cada industria y estos esquemas de repartición a través de esquemas de justicia.

Esta incorporación permitirá obtener soluciones mejores para todos los participantes, evitando el beneficio de unos sobre otros.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL**

Desarrollar y aplicar una estrategia de optimización que permita la síntesis de agua en parques eco-industriales con la distribución justa de los recursos. Lo cual implica proponer una metodología que permita el diseño de redes de intercambio de agua en parques eco-industriales incorporando esquemas de justicia.

#### **1.4.2. OBJETIVOS PARTICULARES**

- ❖ Incluir esquemas de justicia en síntesis de agua en parques eco-industriales.

- ❖ Determinar cuál esquema de justicia es mejor y bajo qué contexto.
- ❖ Determinar para qué casos un esquema de justicia es mejor que otro.

## **1.5. HIPÓTESIS**

Con un modelo matemático para la distribución justa de agua entre plantas en parque eco-industriales se podrán tomar mejores decisiones para una correcta planificación y distribución de los recursos de acuerdo a los requerimientos de las plantas y ambientales.

## 2. MARCO TEÓRICO

### OPTIMIZACIÓN

Optimizar consiste en el uso de herramientas matemáticas para plantear la mejor solución posible de un problema, que puede ser la más rentable, la más eficiente, o cualquiera de los objetivos que se busquen. Es una herramienta fundamental en la toma de decisiones.

La optimización matemática se logra con un conjunto de ecuaciones matemáticas que permitan representar la realidad, también llamados “modelos teóricos”, de los cuales se parte para conocer el comportamiento de un sistema. Al optimizar se determinan entonces los valores de las variables de dichas ecuaciones, que al proceso da los mejores resultados posibles.

### PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA

Constituye un campo amplio de estudio que se ocupa de la teoría, aplicaciones y métodos computacionales para resolver los problemas de optimización condicionada. En estos modelos se busca el extremo de una función objetivo sometida a un conjunto de restricciones que deben cumplirse necesariamente. Las situaciones que pueden afrontarse con la programación matemática se suelen presentar en ingeniería, empresas comerciales y en ciencias sociales y físicas. (Piqueras, 2013).

En el modelo matemático encontramos variables binarias (0 ó 1, existencia o inexistencia, cierto o falso) y variables continuas (valores de  $-\infty$  a  $+\infty$ ) y ecuaciones que pueden ser igualdades (como la función objetivo) o desigualdades (restricciones del proceso mismo). Lo que se plantea es minimizar o maximizar una función objetivo, dado un modelo matemático que represente el proceso a abordar, como se presenta a continuación:

- Función objetivo:

$$\min \text{ o } \max : f(\vec{x}, \vec{y})$$

- Sujeta a restricciones:

De igualdad:  $\vec{h}(\vec{x}, \vec{y}) = 0$

De desigualdad:  $\vec{g}(\vec{x}, \vec{y}) \geq 0$

$$\vec{y} \in [0,1]$$

$$\vec{x} \in \mathbb{R}^2$$

Los problemas de optimización dada su naturaleza pueden ser sin restricciones, univariables o multivariable; o con restricciones.

Los problemas de optimización con restricciones pueden ser:

- Programación lineal (LP), tanto función objetivo como restricciones son lineales, variables involucradas escalares y continuas.
- Programación no lineal (NLP) función objetivo y/o restricciones son no lineales (una al menos), variables involucradas escalares y continuas.
- Programación entera (IP) si es totalmente lineal el problema, variables de decisión escalares y números enteros.
- Programación mixta-entera lineal (MILP), función objetivo y restricciones lineales. Las variables de decisión son escalares.
- Programación mixta entera no lineal (MINLP), tiene variables enteras, así como variables continuas de decisión, al menos un término no lineal en “x”.
- Programación multiobjetivo, cuentan con más de una función objetivo.
- Programación bajo incertidumbre, función objetivo y/o restricciones, tienen variables de incertidumbre.

## **HERRAMIENTA DE GAMS**

El Sistema de Modelado Algebraico General (GAMS), es una plataforma de modelación que permite resolver problemas de optimización mediante un modelado de alto nivel. Dicho programa plantea un lenguaje de modelización, el cual es similar a los lenguajes de programación de cuarta generación, que le permitirá al usuario modelar y resolver problemas de optimización lineal, no lineal, y mixta.

## **PARQUES ECO INDUSTRIALES**

Un parque eco-industrial en que las empresas comparten recursos como materiales, agua, energía, con la finalidad de encontrar una mejora económica y ambiental (reducción de

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

residuos y contaminación). Esto es, varias plantas cercanas una a la otra, intercambiando recursos a manera de maximizar sus ganancias y minimizar su impacto ambiental.

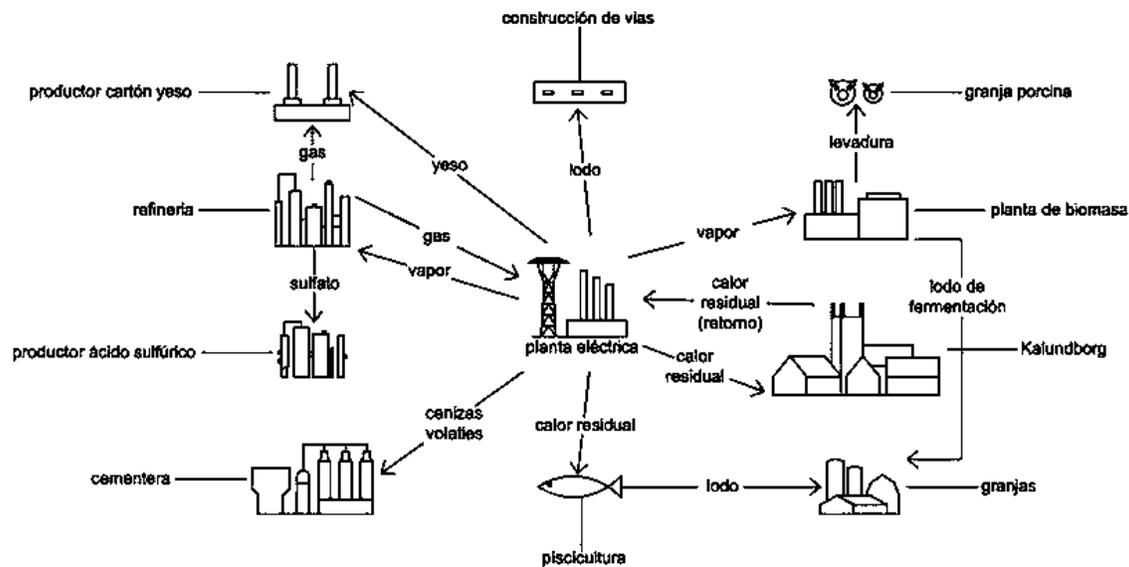


Figura 4. La simbiosis industrial de Kalundborg en Dinamarca (en 2002). Fuente: The Center for Industrial Symbiosis, Kalundborg (Hansen, 2003).

Un ejemplo muy citado lo encontramos en la ciudad de Kalundborg, al norte de Dinamarca, donde en la década de 1960 se configuró un parque eco-industrial a gran escala con cooperación público-privada, **Figura 4**. La simbiosis industrial de Kalundborg está formada por nueve miembros: Novo Nordisk, fabricante de insulina; Novozymes, productor de enzimas; Gyproc, fabricante de placas de yeso; Dong Energy, propietaria de Asnaes, la mayor central productora de energía en Dinamarca; RGS 90, gestora de residuos y suelos contaminados; Statoil, propietaria de la mayor refinería de petróleo de Dinamarca; Kara/Novoren, compañía de tratamiento de residuos; Kalundborg Forsyning, encargado del suministro de agua y electricidad y eliminación de las aguas residuales, y el gobierno de Kalenborg. Las relaciones entre las plantas son las siguientes:

- La planta eléctrica cuenta con el respaldo de la planta refinadora de petróleo.
- La planta eléctrica vende vapor a la refinadora y a la planta farmacéutica, y el calor obtenido de los generadores se usa para la calefacción de edificios de la ciudad, así como para calentar invernaderos y granjas acuícolas.
- El yeso residual fruto del proceso de desulfuración del humo procedente de la producción de la central eléctrica (unas 150,000 toneladas al año) es utilizado por Gyproc para fabricar placas de yeso para la industria de la construcción.

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

- Por otra parte, 150,000 toneladas de levadura, un producto residual de la producción de insulina de Novo Nordisk se utilizan como alimento para más de 800,000 cerdos cada año. Los residuos orgánicos que producen Novo Nordisk y Novozymes se utilizan posteriormente como fertilizantes en la agricultura.
- Además 300,000 toneladas de paja se convierten en 5,4 millones de litros de etanol. (Herrero et al., 2020).

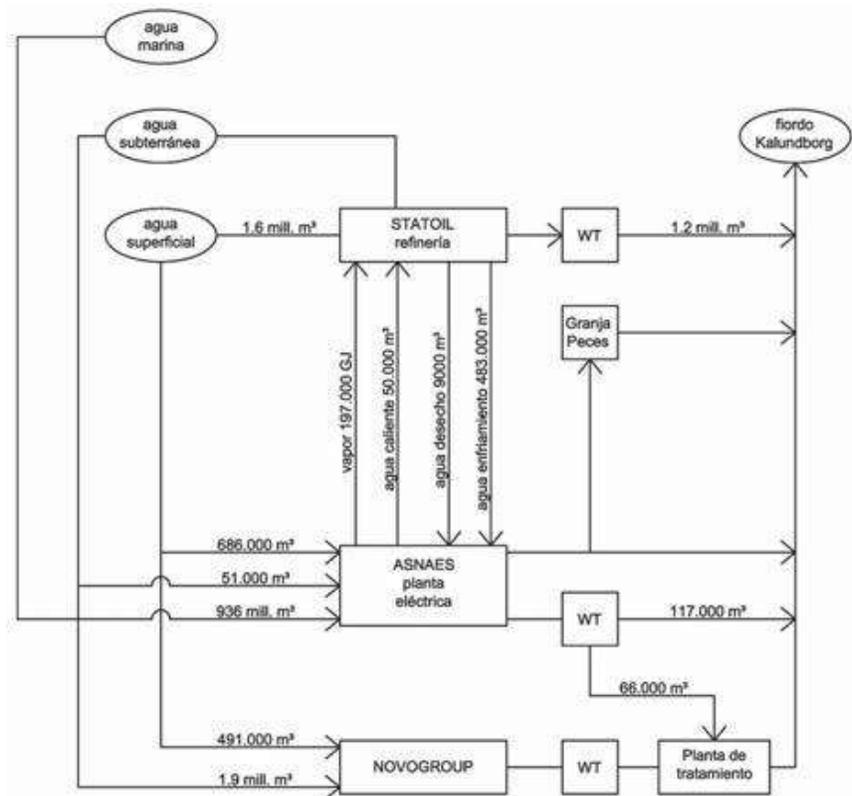


Figura 5. Simbiosis Industrial del flujo de agua en Kalundborg ( $m^3/año$ ) en 2002. Fuente: Green Accounts from Kalundborg Center for Industrial Symbiosis (Hansen, 2004). El estudio de SFA (Análisis de Flujo de Sustancia) del agua.

## REDES DE AGUA

Las redes de agua son tomadas como un sistema de distribución de la misma, desde el lugar de captación hasta cada usuario cumpliendo ciertas características según su uso. Ahora bien, la síntesis de redes de agua abarca el sistema de tratamiento de los efluentes y también la descarga al medio ambiente. Un ejemplo es presentado en la **Figura 5**, del parque eco-industrial de Kalundborg, Dinamarca, citado anteriormente.

## **INTEGRACIÓN DE PROPIEDAD**

La integración de la propiedad es un enfoque holístico basado en la funcionalidad para la asignación y manipulación de corrientes y unidades de procesamiento, que se basa en el seguimiento, el ajuste, la asignación y la combinación de funcionalidades a lo largo del proceso. (El-Halwagi et al., 2004). Bajo este enfoque se pretende tratar a las corrientes en función de sus propiedades como son pH, toxicidad, color, y no cada componente que ocasiona desviaciones en sus valores. Las corrientes residuales contienen enorme cantidad de componentes y las trazas suelen ser las que cambian las propiedades de dichas corrientes, por lo que, en lugar de manejar muchísimos componentes se trata la propiedad.

## **ESQUEMAS DE JUSTICIA**

Los esquemas de justicia proponen una repartición de los bienes y servicios, donde cada usuario se trata de acuerdo con sus particularidades, sin favorecer a uno sobre el otro. Donde, dependiendo de la naturaleza del usuario, tamaño y propiedades, le serán repartidos los recursos. Bajo este contexto, independientemente de las utilidades que genere cada planta, la repartición del agua y unidades de tratamiento será aquella que beneficie a todas de manera análoga. Estos esquemas buscan obtener una repartición correcta de los recursos, sobre todo en un escenario de escasez de los mismos, y la idea fundamental es que esta repartición justa sea demostrable matemáticamente. Es por ello que los matemáticos involucrados en el desarrollo de dichos esquemas han tenido tanta relevancia que algunos han sido merecedores premios Nobel por estos desarrollos (por ejemplo, el matemático estadounidense John Nash recibió el premio Nobel de economía).

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema abordado en el presente trabajo se describe a continuación. Para disminuir el consumo de recursos frescos (agua) y descarga de corrientes residuales al medio ambiente en un parque eco-industrial se propone la síntesis de redes de agua a través de un modelo basado en la integración másica y de propiedad, en el que se plantea reciclar directamente y reutilizar fuentes del proceso tratadas mediante interceptores de propiedad, donde son incluidas restricciones ambientales y de proceso. Las propiedades a tratar en el modelo, son restricciones para las corrientes del proceso y ambientales dadas en términos de composición, toxicidad, demanda química de oxígeno, color, olor, pH, densidad y viscosidad. Se debe satisfacer la demanda de agua de cada una de las plantas y encontrar la configuración que disminuya el costo total de una manera justa para las plantas participantes. Los principales beneficios encontrados incluyen el reúso de agua que disminuye en gran medida el impacto ambiental y la asignación justa de los recursos, que no ha sido abordada previamente. El modelo de programación matemático propuesto está basado en la superestructura representada en la **Figura 4**, distintas fuentes de proceso de cada planta (fuentes a tratar, flechas color naranja), las cuales ingresan a una red interceptora de propiedad donde son tratadas, cumpliendo a la salida de esta con restricciones ambientales y de proceso, para así redirigirlas nuevamente a las plantas o descargarlas al medio ambiente, a su vez, fuentes frescas con distintas propiedades son enviadas a las corrientes de proceso con la finalidad de satisfacer por completo la demanda de cada una de las plantas. A continuación, se presentará el modelo matemático, y más adelante su aplicación en tres casos de estudio.

#### 3.2. FORMULACIÓN DEL MODELO

El modelo propuesto se basa en la superestructura que se muestra en la Figura 2 y consta de las siguientes relaciones.

##### 1. División de las fuentes frescas

Las fuentes frescas se dirigen directamente a las corrientes de proceso ( $j$ ):

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

$$F_r = \sum_{j \in NSINKS} f_{r,j}, \quad r \in FRESH \quad (1)$$

En esta ecuación  $F_r$  es el caudal total para la fuente fresca  $r$  donde es el caudal segregado (separado) desde las fuentes frescas  $r$  y dirigido a la corriente de proceso  $j$ . Las fuentes frescas no están dirigidas al medio ambiente ni a interceptores de propiedad.

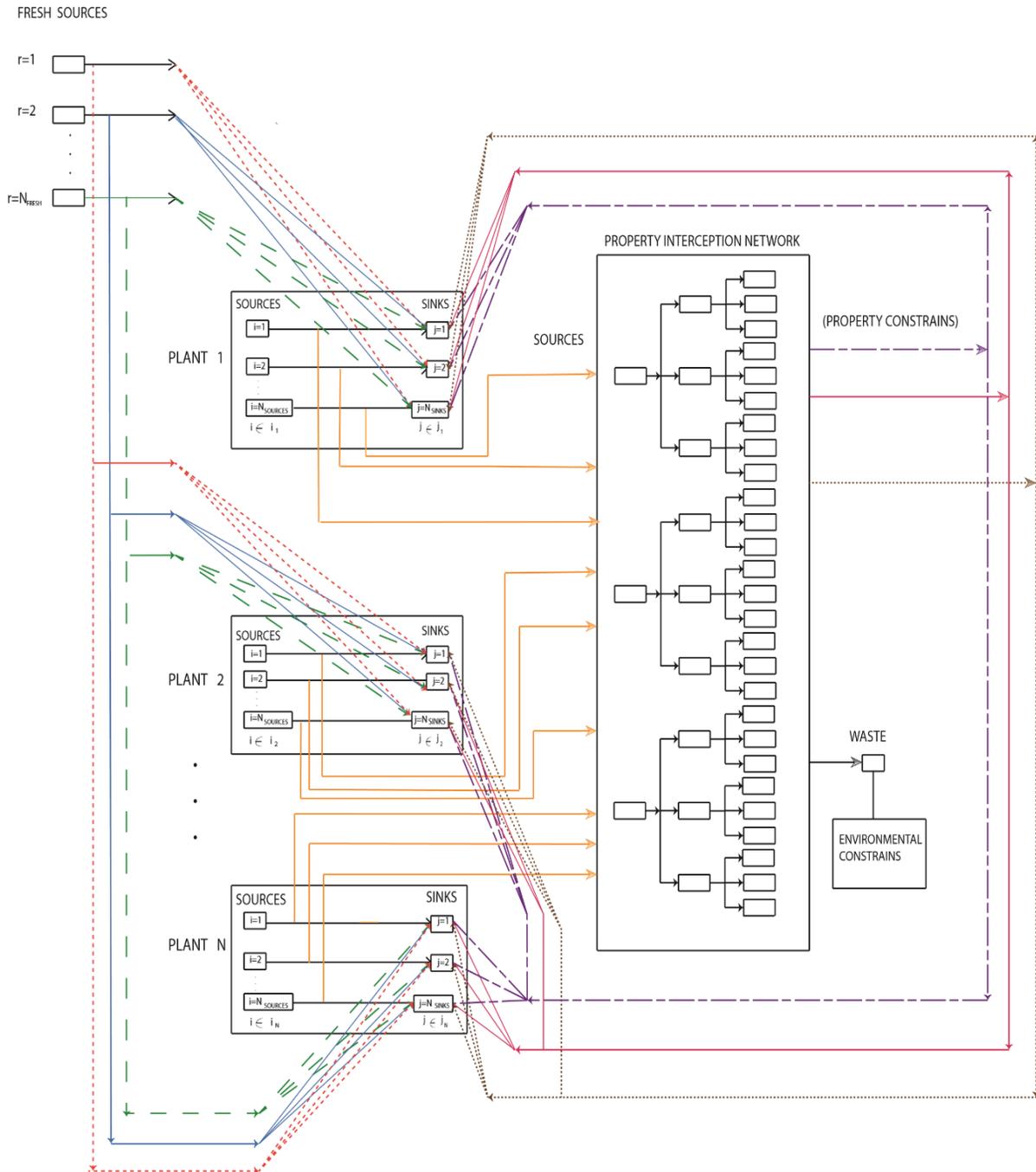


Figura 6. Superestructura propuesta.

## 2. División de las fuentes del proceso a los interceptores de propiedad

La formulación de la red de interceptación de propiedades no permite la mezcla de diferentes flujos de proceso después de la estructura de la red, de esta manera se eliminan las no linealidades involucradas en los balances de propiedad. Usamos una unidad ficticia para cualquier propiedad que no sea interceptada sin costo o efectividad y su posición está al final de la red (la unidad ficticia es solo para una propiedad).

Cualquier interceptor de propiedad tiene una efectividad y un costo determinados. El caudal másico para cada fuente de proceso se separa y se envía a diferentes interceptores para esa propiedad, es decir, para la primera propiedad que se intercepta.

$$W_i = \sum_{int^1 \in INT^1} w_i^{int^1}, \quad i \in NSOURCES \quad (2)$$

Del mismo modo, para que la segunda propiedad sea interceptada, el caudal másico de cada interceptor para la primera propiedad se separa y se envía a los interceptores de propiedad para la propiedad dos:

$$w_i^{int^1} = \sum_{int^2 \in INT^2} w_i^{int^1, int^2}, \quad i \in NSOURCES, int^1 \in INT^1 \quad (3)$$

De la misma manera, se aplica la última ecuación para que todas las propiedades se intercepten de la siguiente manera:

$$w_i^{int^1, int^2, \dots, int^{N-1}} = \sum_{int^N \in INT^N} w_i^{int^1, int^2, \dots, int^N}, \quad i \in NSOURCES, int^1 \in INT^1, \dots, int^{N-1} \in INT^{N-1} \quad (4)$$

## 3. División de las fuentes de proceso tratadas

Después de que las propiedades de las fuentes de proceso sean interceptadas (fueron tratadas), serán dirigidas a las corrientes de proceso y a los residuos vertidos al medio ambiente:

$$w_i^{int^1, \dots, int^N} = \sum_{j \in SINKS} g_{i,j}^{int^1, \dots, int^N} + g_{i,waste}^{int^1, \dots, int^N}, \quad i \in NSOURCES, int^1 \in INT^1, \dots, int^N \in INT^N \quad (5)$$

#### 4. Balance de masa en las corrientes de proceso

La suma de los caudales de cualquier fuente de proceso interceptada por cualquier interceptor de propiedad y los caudales de las fuentes frescas nos dan el caudal total de entrada a cualquier sumidero de proceso.

$$G_j = \sum_{i \in NSOURCES} \sum_{int^1} \dots \sum_{int^N} g_{i,j}^{int^1, \dots, int^N} + \sum_{r \in FRESH} f_{r,j}, \quad j \in NSINKS \quad (6)$$

#### 5. Balance de la propiedad en las corrientes de proceso

El valor de las propiedades en la condición de entrada de las corrientes está determinado por el equilibrio de propiedades en el punto de mezcla antes de cualquier corriente:

$$\psi_p (P_{j,p}^{InSink}) G_j = \sum_{i \in NSOURCES} \sum_{int^1} \dots \sum_{int^N} \left[ \psi_p (P_{i,p}^{OutPIN, int^1, \dots, int^N}) g_{i,j}^{int^1, \dots, int^N} \right] + \sum_{r \in FRESH} \left[ \psi_p (P_{r,p}^{InFresh}) f_{r,j} \right],$$

$$j \in NSINKS, p \in NPROP \quad (7)$$

#### 6. Balance de masa para corrientes de desechos

El caudal total de una corriente residual está dado por la suma de las fuentes de proceso de los interceptores de propiedad:

$$waste = \sum_{i \in NSOURCES} \sum_{int^1} \dots \sum_{int^N} g_{i,waste}^{int^1, \dots, int^N} \quad (8)$$

#### 7. Balance de propiedad de las corrientes de desechos

Es necesario un equilibrio de propiedades para determinar la propiedad de un flujo de desechos:

$$\psi_p (P_{waste,p}) waste = \sum_{i \in NSOURCES} \sum_{int^1} \dots \sum_{int^N} \left[ \psi_p (P_{i,p}^{OutPIN, int^1, \dots, int^N}) g_{i,j}^{int^1, \dots, int^N} \right], \quad (9)$$

$$p \in NPROP$$

Las propiedades de la corriente residual se incluyen debido a las regulaciones ambientales.

#### 8. Restricciones de las corrientes de proceso

Los operadores de propiedad dan los límites de sumideros del proceso para eliminar los términos no lineales. Todos los sumideros de proceso incluyen restricciones de proceso específicas (composición de compuestos químicos específicos, densidad, viscosidad, pH, etc.):

$$\psi_p(P_{j,p}^{\min, Sink}) \leq \psi_p(P_{j,p}^{\text{in}, Sink}) \leq \psi_p(P_{j,p}^{\max, Sink}), \quad j \in \text{NSINKS}, P \in \text{NPROP} \quad (10)$$

### 9. Restricciones ambientales

Las restricciones ambientales incluyen la composición de materiales peligrosos y propiedades específicas como pH, color, olor, DQO y otras:

$$\psi_p(P_{j,p}^{\min, Env}) \leq \psi_p(P_{\text{waste}, p}) \leq \psi_p(P_{j,p}^{\max, Env}), \quad j \in \text{NSINKS}, P \in \text{NPROP} \quad (11)$$

## COSTOS

### COSTO DE TUBERÍAS Y BOMBEO

Las siguientes ecuaciones muestran el costo de tubería y bombeo por sección específica

#### 1. Fuentes-interceptores

El costo de la tubería y el bombeo entre fuentes e interceptores ( $PipeCost_i^{\text{Source-Int}}$ ) depende del caudal segregado de la fuente del proceso ( $i$ ) a los interceptores multiplicado por un costo unitario:

$$PipeCost_i^{\text{Source-Int}} = \sum_{\text{int}^1} \dots \sum_{\text{int}^N} UC_{i, \text{int}^1, \dots, \text{int}^N}^{\text{Pipe-Source}} \cdot w_i^{\text{int}^1, \dots, \text{int}^N}, \quad i \in \text{NSOURCES} \quad (12)$$

#### 2. Interceptores-corrientes de proceso

El costo de la tubería y bombeo entre los interceptores y los sumideros ( $j$ ) depende del flujo separado de los interceptores a la corriente del proceso ( $j$ ) desde la fuente del proceso ( $i$ ) multiplicado por un costo unitario:

$$PipeCost_j^{\text{Int-Sink}} = \sum_{i \in \text{NSOURCES}} \sum_{\text{int}^1} \dots \sum_{\text{int}^N} UC_{i, j, \text{int}^1, \dots, \text{int}^N}^{\text{Int-Sink}} \cdot g_{i, j}^{\text{int}^1, \dots, \text{int}^N}, \quad j \in \text{NSINKS} \quad (13)$$

#### 3. Interceptores-residuos

El costo de tubería y bombeo entre interceptores y residuos ( $PipeCost_i^{\text{Int-Waste}}$ ) depende del flujo segregado de los interceptores a los desechos para la fuente del proceso ( $i$ ) multiplicado por un costo unitario:

$$PipeCost_i^{\text{Int-Waste}} = \sum_{j \in \text{NSINKS}} \sum_{\text{int}^1} \dots \sum_{\text{int}^N} UC_{i, j, \text{int}^1, \dots, \text{int}^N}^{\text{Int-Sink}} \cdot g_{i, \text{waste}}^{\text{int}^1, \dots, \text{int}^N}, \quad i \in \text{NSOURCES} \quad (14)$$

#### 4. Fuentes frescas-corrientes de proceso

El costo de la tubería y el bombeo entre interceptores y sumideros ( $PipeCost_j^{Fresh-Sink}$ ) depende del flujo segregado de la fuente fresca ( $r$ ) al sumidero ( $j$ ) multiplicado por un costo unitario:

$$PipeCost_j^{Fresh-Sink} = \sum_{r \in NFRESH} UC_{r,j,int^1, \dots, int^N}^{Fresh-Sink} \cdot f_{r,j}, \quad j \in NSINKS \quad (15)$$

#### 5. Costo del agua fresca

El costo del agua dulce ( $FreshWaterCost_j$ ) está relacionado con las horas de operación por año ( $H_Y$ ) y el flujo segregado de la fuente fresca ( $r$ ) al sumidero ( $j$ ), se determina con la siguiente relación:

$$FreshWaterCost_j = H_Y \cdot \sum_{r \in NFRESH} UC_r^{FreshWater} \cdot f_{r,j}, \quad j \in NSINKS \quad (16)$$

### COSTOS DE TRATAMIENTO

#### 1. Interceptores-Corrientes de proceso

Los costos de tratamiento entre interceptores y corrientes de proceso ( $TreatmentCosts_j^{Sinks}$ ) están relacionados con las horas de operación por año ( $H_Y$ ) y el flujo segregado de los interceptores al sumidero del proceso ( $j$ ) para la fuente del proceso ( $i$ ) multiplicado por un costo unitario de tratamiento, donde cada interceptor tiene un costo unitario de tratamiento diferente:

$$TreatmentCosts_j^{Sinks} = H_Y \cdot \sum_{i \in NSOURCES} \sum_{int^1} \dots \sum_{int^N} UC_{i,j,int^1, \dots, int^N}^{Treatment} \cdot g_{i,j}^{int^1, \dots, int^N}, \quad j \in NSINKS \quad (17)$$

#### 2. Fuentes-Residuos

El costo de tratamiento entre fuentes y residuos ( $TreatmentCosts_i^{Waste}$ ) está relacionado con las horas de operación por año ( $H_Y$ ), y el flujo segregado de los interceptores a los desechos por fuente de proceso ( $i$ ) multiplicado por un costo unitario de tratamiento:

$$TreatmentCosts_i^{Waste} = H_Y \cdot \sum_{int^1} \dots \sum_{int^N} UC_{i,j,int^1, \dots, int^N}^{Treatment} \cdot g_{i,waste}^{int^1, \dots, int^N}, \quad i \in NSOURCES \quad (18)$$

### 3. Costo de los interceptores

El costo del tratamiento en los interceptores ( $TreatmentIntCosts_i$ ) está relacionado con las horas de operación por año ( $H_Y$ ), el flujo segregado de la fuente del proceso ( $i$ ) a cada interceptores ( $int^1, \dots, int^N$ ), multiplicado por un costo de tratamiento:

$$TreatmentIntCosts_i = H_Y \sum_{i \in NSOURCES} \left( \sum_{int^1 \in int^1} \left( Cost_p^{int^1} w_i^{int^1} + \sum_{int^N \in int^N} \left( Cost_p^{int^N} w_i^{int^1, \dots, int^N} \right) \right) \right) \quad (19)$$

### 4. Costo total por planta

El costo total por planta incluye los costos de tuberías y bombeo y el costo de tratamiento de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} TotalCostPlant_{pp} = & \sum_{i \in i_{pp}} PipeCost_i^{Source-Int} + \sum_{j \in j_{pp}} PipeCost_j^{Int-Sink} + \sum_{j \in j_{pp}} PipeCost_j^{Int-Waste} + \\ & \sum_{j \in j_{pp}} FreshWaterCost_j + \sum_{j \in j_{pp}} TreatmentCosts_j^{Sinks} + \sum_{i \in i_{pp}} TreatmentCosts_i^{Waste} + \\ & \sum_{j \in j_{pp}} TreatmentIntCosts_j \end{aligned} \quad (20)$$

### Costo total anual

El costo total anual del parque será igual a la suma del costo de cada planta:

$$TotalCost = \sum_{pp} TotalCostPlant_{pp} \quad (21)$$

### Costo bajo el esquema de Rawlsian

El costo total anual de cada planta deberá ser inferior a la variable  $CostMayor$  (variable a minimizar):

$$CostMayor > TotalCostPlant_{pp} \quad (22)$$

### Costo bajo el esquema de Nash

El costo de bienestar de Nash será igual a la suma de los logaritmos del costo total de cada una de las plantas participantes.

$$CostNash = \sum_{pp} \log_{10}(1 + TotalCostPlant_{pp}) \quad (23)$$

### 3.3. CASOS DE ESTUDIO

Para ilustrar la aplicabilidad de la metodología propuesta para resolver la integración de masa y propiedad en un parque eco-industrial considerando restricciones ambientales y del proceso para cada planta, se analizan tres casos de estudio. Los casos de estudio consisten en el diseño conceptual de la aplicación de los sistemas de agua, donde se necesita agua para satisfacer ciertas demandas y se generan aguas residuales durante todos los procesos. El tiempo de operación del proceso es tomado como 8000 h/año. Los casos de estudio 2 y 3 han sido abordados previamente por Rubio-Castro et al. (2013), reportando valores típicos encontrados en la industria de procesos.

#### CASO DE ESTUDIO 1

Como primer caso se consideran tres plantas, cada una con una fuente de proceso (a tratar) y una corriente (a satisfacer). Las propiedades de las fuentes frescas y de proceso están reportadas en la Tabla 1, las propiedades de las restricciones de las corrientes y ambientales están reportados en la Tabla 2. Para este caso, se optimizará el costo de cada una de las plantas buscando el mejor escenario, o bien, el que reporte menor costo para cada una y cumpla con los requerimientos de todas.

*Tabla 2. Propiedades de las fuentes frescas y de proceso del caso 1.*

Plantas	Fuentes	Flujo (kg/h)	Composición (ppm)	Toxicidad (%)	THOD (mg O <sub>2</sub> /L)	pH	COLOR
<b>1</b>	1	8083	0.016	0.300	0.2	5.40	0.0003
<b>2</b>	2	3900	0.024	0.500	48.9	5.10	0.0009
<b>3</b>	3	3279	0.220	1.500	92.1	4.80	0.0002
	Fuente fresca 1	-	0.000	0.000	0.0	7.00	0
	Fuente fresca 2	-	0.010	0.100	0.0	6.80	0.0001

*Tabla 3. Restricciones de las corrientes de proceso y agua de desecho del caso 1.*

Plantas	Corrientes	Flujo (kg/h)	Composición máx (ppm)	pH	
				Min	Máx
<b>1</b>	1	6000	0.013	5.3	8.0
<b>2</b>	2	2490	0.011	5.4	7.8
<b>3</b>	3	4400	0.100	5.2	8.2
<b>Agua de desecho</b>			0.005	5.5	9.0

## CASO DE ESTUDIO 2

Como segundo caso se encuentra un PEI que consta de tres plantas con tres fuentes de proceso y tres sumideros de proceso cada una, cuyos datos se muestran en la Tabla 3 y en la Tabla 4. Se consideran dos propiedades, composición y toxicidad, y se dispone de una fuente fresca (agua dulce pura) con un costo unitario de 0,009 US \$ / kg.

*Tabla 4. Propiedades de las fuentes frescas y de proceso del caso 2.*

PLANTAS	FUENTES	FLUJO (KG/H)	COMPOSICIÓN (PPM)		TOXICIDAD (%)	
			Min	Máx	Min	Máx
1	1	2900	0.033		1.800	
	2	2450	0.022		0.500	
	3	8083	0.016		2.300	
2	4	3900	0.024		1.500	
	5	3279	0.220		1.500	
	6	3100	0.010		0.750	
3	7	1800	0.160		1.400	
	8	1750	0.100		1.750	
	9	2000	0.110		1.300	
	Fuente fresca	-	0.000		0.000	

*Tabla 5. Restricciones de las corrientes de proceso y agua de desecho del caso 2.*

PLANTAS	CORRIENTES	FLUJO (KG/H)	COMPOSICIÓN (PPM)		TOXICIDAD (%)	
			Min	Máx	Min	Máx
1	1	2900	0	0.013	0	1.500
	2	2450	0	0.011	0	0.750
	3	8083	0	0.013	0	1.250
2	4	3900	0	0.011	0	1.750
	5	3279	0	0.100	0	1.150
	6	3100	0	0.100	0	0.800
3	7	1800	0	0.010	0	0.950
	8	1750	0	0.040	0	0.750
	9	2000	0	0.020	0	1.250
	Agua de desecho	-	0	0.075	0	0.000

### CASO DE ESTUDIO 3

Como tercer caso consideramos tres plantas con tres fuentes de proceso y tres sumideros de proceso cada una. Las propiedades a tratar son toxicidad, pH y demanda teórica de oxígeno (THOD). Hay dos tipos de fuentes frescas disponibles con costos unitarios de 0.009 US \$ / kg y 0.0075 US \$ / kg para las corrientes de agua fresca 1 y 2, respectivamente. Los datos de las fuentes del proceso y fuentes frescas se encuentran en la Tabla 5, y las restricciones para las corrientes de proceso y desecho se encuentran en la Tabla 6.

*Tabla 6. Propiedades de las fuentes frescas y de proceso del caso 3.*

PLANTAS	FUENTES	FLUJO (KG/H)	TOXICIDAD (%)	PH	THOD (MG O <sub>2</sub> /L)
<b>1</b>	1	3550	0.95	6.00	60.0
	2	1000	1.75	5.40	88.0
	3	5000	0.50	5.50	60.0
<b>2</b>	4	4580	1.50	5.40	65.0
	5	5000	0.85	6.00	100.0
	6	4000	1.70	5.80	80.0
<b>3</b>	7	5500	1.30	6.00	85.0
	8	1100	0.50	5.90	60.0
	9	8500	1.00	5.50	100.0
	Fuente fresca 1	-	0.00	7.00	0.0
	Fuente fresca 2	-	0.01	6.80	0.0

*Tabla 7. Restricciones de las corrientes de proceso y agua de desecho del caso 2.*

PLANTAS	CORRIENTES	FLUJO (KG/H)	TOXICIDAD (%)		PH		THOD (MG O <sub>2</sub> /L)	
			Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
<b>1</b>	1	3550	0	2.00	5.10	8.50	0	75.0
	2	1000	0	0.75	5.20	8.50	0	75.0
	3	5000	0	1.30	5.10	8.50	0	100.0
<b>2</b>	4	4580	0	1.00	5.20	8.00	0	75.0
	5	5000	0	0.95	5.30	8.00	0	75.0
	6	4000	0	1.25	5.25	8.50	0	65.0
<b>3</b>	7	5500	0	0.50	5.30	8.00	0	100.0
	8	1100	0	2.00	5.20	9.50	0	65.0
	9	8500	0	1.20	5.20	7.00	0	65.0
	Agua de desecho	-	0	0.00	5.80	9.00	0	60.0

## 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de los casos de estudio fueron obtenidos utilizando el modelo propuesto a través de los resolvidores CONOPT para la formulación NLP y CPLEX para la reformulación relajada propuesta.

### CASO 1

Primeramente, se obtuvo la solución para el mínimo TAC, la cual nos lleva al menor costo global (entre las tres plantas); después se minimizó el costo anual de cada planta por separado. Por lo que son considerados 4 escenarios para este caso de estudio; el escenario A, representa el mínimo TAC (global), y los escenarios B, C y D, representan el TAC mínimo de las plantas 1, 2 y 3 respectivamente. Los resultados son discutidos a continuación.

Como se puede observar en la Tabla 1, la planta 1 es la más grande, sin embargo, cuenta con el agua menos contaminada, contrario a la planta 3, que es la de menor tamaño y agua más contaminada. Las corrientes de la planta 3 comparadas con las de la planta 1, cuentan con restricciones menos estrictas. En la Figura 1 se muestran cualitativamente, la diferencia en cuanto al flujo y calidad del agua entre las tres plantas.

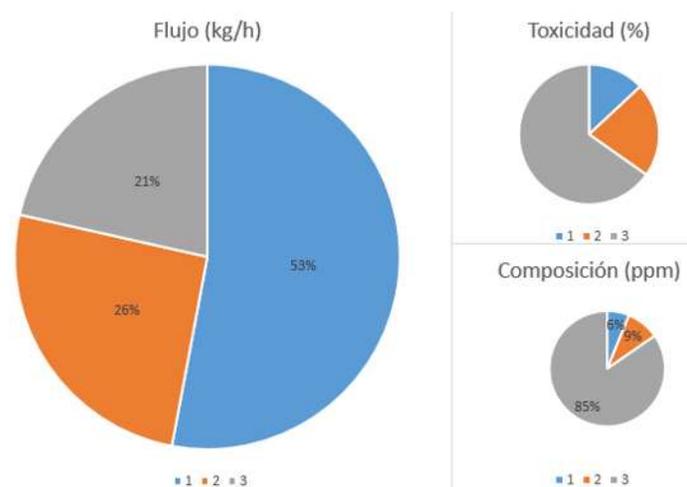


Figura 7. Comparación entre plantas (caso 1).

El problema asociado a este caso de estudio cuenta con 6,653 variables y 1825 restricciones, y es resuelto en un promedio de 0.934 s de CPU en una computadora con un procesador Intel Celeron a 2.16 GHz y de 4.00 GB RAM. Al resolver en la plataforma de optimización GAMS 30.2.0 se obtienen los resultados que a continuación se discuten.

La **Figura 7** presenta la solución obtenida para el escenario A en el que se minimiza el costo total social. Para este escenario se utilizan 637 kg/h de agua fresca a la vez que se descargan 3,009 kg/h de agua de desecho, de este modo se logra reciclar y reutilizar 12,254 kg/h de los 15,262 kg/h que se encontraban inicialmente. Como se logrará apreciar más adelante, este escenario es el que requiere menor cantidad de agua fresca y a su vez el que descarga menos al ambiente.

La **Figura 9** presenta la estructura obtenida para el escenario B, en el cual se minimizan los costos de la planta 1. Para este escenario se utilizan 4,807 kg/h de agua fresca se tratan las fuentes de proceso de las plantas 2 y 3 para ser descargadas como agua de desecho, de este modo se logra reciclar y reutilizar el agua proveniente de la planta 1.

Para el escenario C mostrado en la **Figura 10**, se minimizan los costos de la planta 2, ésta misma recibe sólo agua fresca, el agua de la planta 3 recibe tratamiento sólo para cumplir con las restricciones ambientales y ser desechada. El consumo de agua fresca incrementa a 5,240 kg/h. Es el escenario más costoso debido a que cuenta con más unidades de tratamiento.

El escenario D presentado en la **Figura 11**, es el que requiere más agua fresca (9,611kg/h) desechando completamente el agua proveniente de las plantas 1 y 2, la cual sólo es tratada para satisfacer las restricciones ambientales.

La **Figura 6** muestra el costo de cada planta en función del objetivo a minimizar, a manera de interpretar de una manera más visual los resultados reportados en la **Tabla 8**. Como se logra apreciar en dicha figura, al minimizar el costo por planta nos lleva a soluciones donde encontramos un costo total hasta veinte veces más grande que el de la solución global del escenario A. El propósito de este caso es demostrar la dificultad encontrada al beneficiar más a una planta sobre las otras, y que el minimizar el costo global suele hacer lo mismo. A su vez, nos muestra que para que una planta llegue a su punto utópico (de mínimo costo) la red de distribución y tratamiento se agiganta.

La **Tabla 8** nos muestra los resultados obtenidos bajo las distintas funciones objetivo, que son minimizando el costo de cada una de las plantas para encontrar su punto utópico, escenarios B, C y D, y minimizando el costo bajo los esquemas de justicia abordados en el trabajo. Para encontrar la mejor solución se compara entonces el punto utópico (costo mínimo

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

encontrado de la planta, resaltado en color azul), con el valor proporcionado bajo los diferentes esquemas de justicia.

La **Figura 7** nos muestra qué tan alejado se encuentra el costo de una planta de su punto utópico. El punto utópico de cada planta se encuentra justo en el centro del eje radial, dando el valor óptimo individual, o bien en el que encontramos un 0% de insatisfacción. Valores más próximos al centro representan entonces los mejores escenarios para las plantas, y valores cercanos a los vértices corresponderán entonces a los peores escenarios, cada color representa a un esquema de justicia. Las cantidades mostradas en el gráfico se obtienen al comparar el valor obtenido bajo el esquema de justicia con el punto utópico (mejor escenario) y su peor escenario. Por ejemplo, para la Planta 1 en el esquema de bienestar social el valor obtenido corresponde a la relación  $\frac{(333,000-1578.70)}{7,580,000} \times 100$ , para el esquema de justicia de Rawlsian  $\frac{(145,520-1578.70)}{7,580,000} \times 100$  y para el de bienestar de Nash  $\frac{(658,730-1578.70)}{7,580,000} \times 100$ , y así sucesivamente para cada planta bajo cada esquema.

Se logra observar que, bajo el esquema de justicia de Nash se ven mayormente favorecidas las plantas 2 y 3; bajo el esquema de bienestar social ocurre del mismo modo; siendo el esquema de justicia de Rawlsian el que beneficia en menor medida a una planta sobre la otra. Por lo que una distribución más justa de los recursos bajo éste último esquema, además de esto se aleja un 7.8% del costo total encontrado en el esquema de bienestar social.

	<b><i>FUNCIÓN OBJETIVO</i></b>					
	TOTALCOST (BIENESTAR SOCIAL)	COSTMIN PLANT 1	COSTMIN PLANT 2	COSTMIN PLANT 3	COSTMAYOR (RAWLSIAN)	COSTNASH (NASH)
	Escenario A	Escenario B	Escenario C	Escenario D		
<b><i>PLANTA 1</i></b>	333,000.00	1,578.70	7,580,000	5,130,000	145,520.00	658,730.00
<b><i>PLANTA 2</i></b>	60,718.90	5,020,000.00	0.86	3,780,000	145,520.00	0.86
<b><i>PLANTA 3</i></b>	45,777.10	3,540,000.00	3,510,000	26,446.63	145,520.00	46,275.47
<b><i>COSTO TOTAL</i></b>	458,000.00	8,900,000.00	11,400,000	9,620,000	493,830.00	880,460.00

Tabla 8. Costos por planta y totales bajo diferentes funciones objetivo en los distintos escenarios.

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

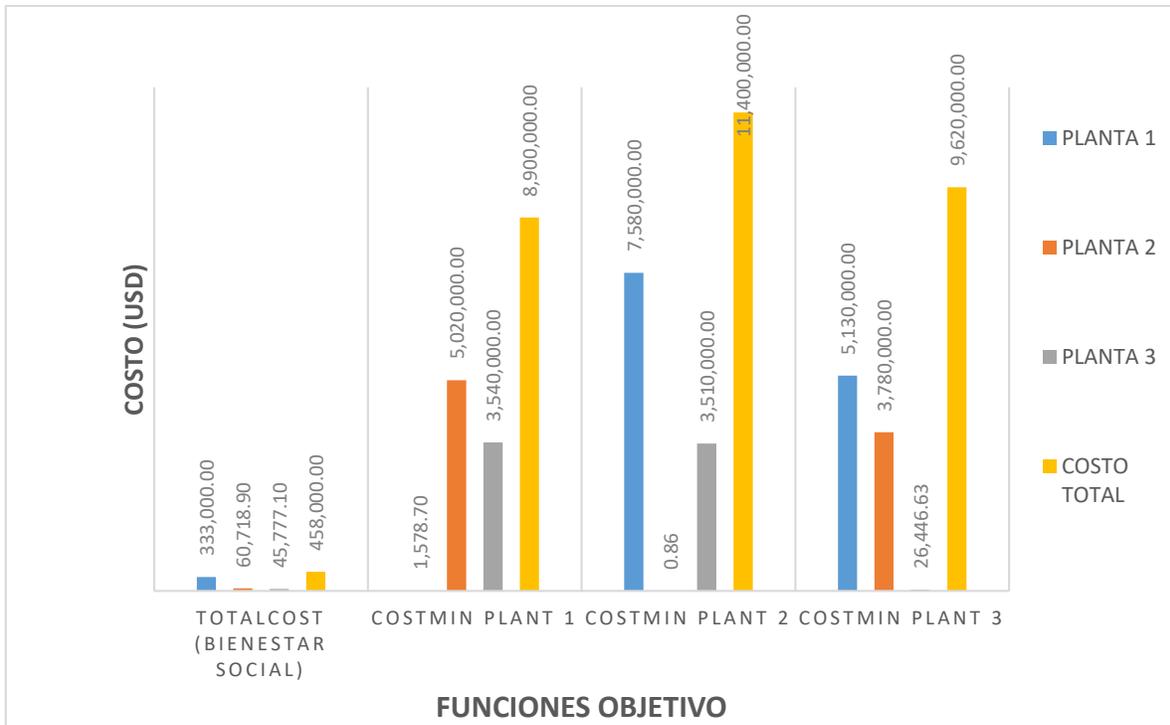


Figura 8. Costo de cada planta acorde a la función objetivo.

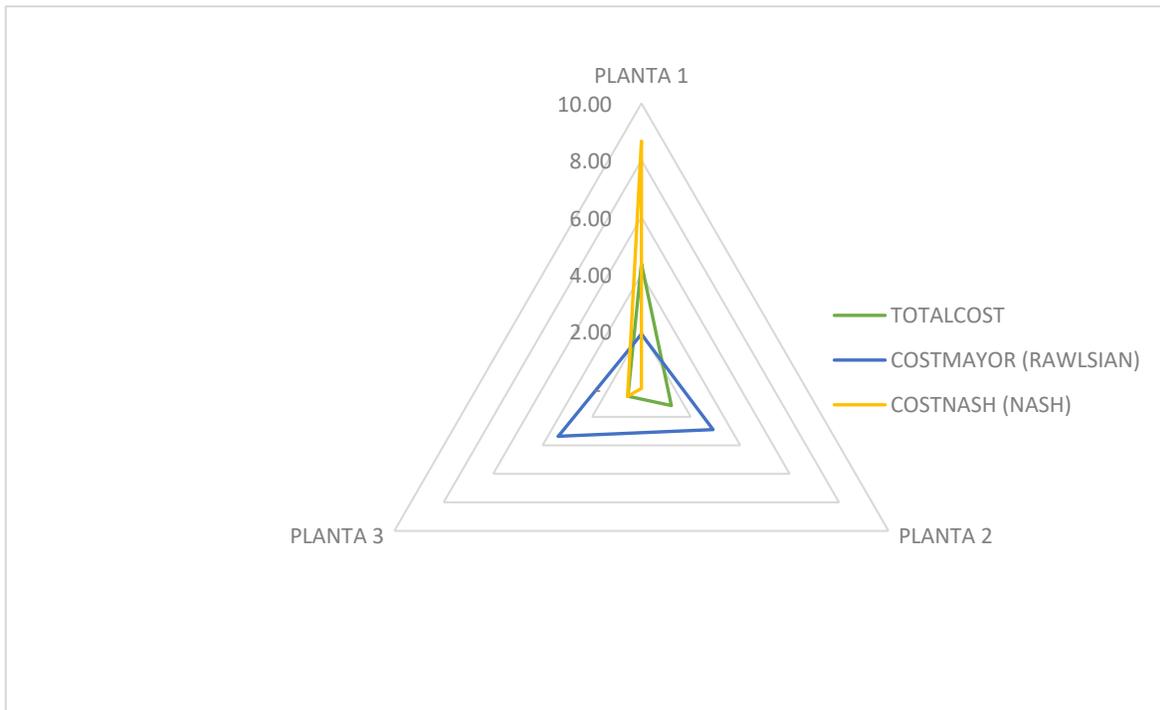


Figura 9. Diagrama radial del Caso 1.

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

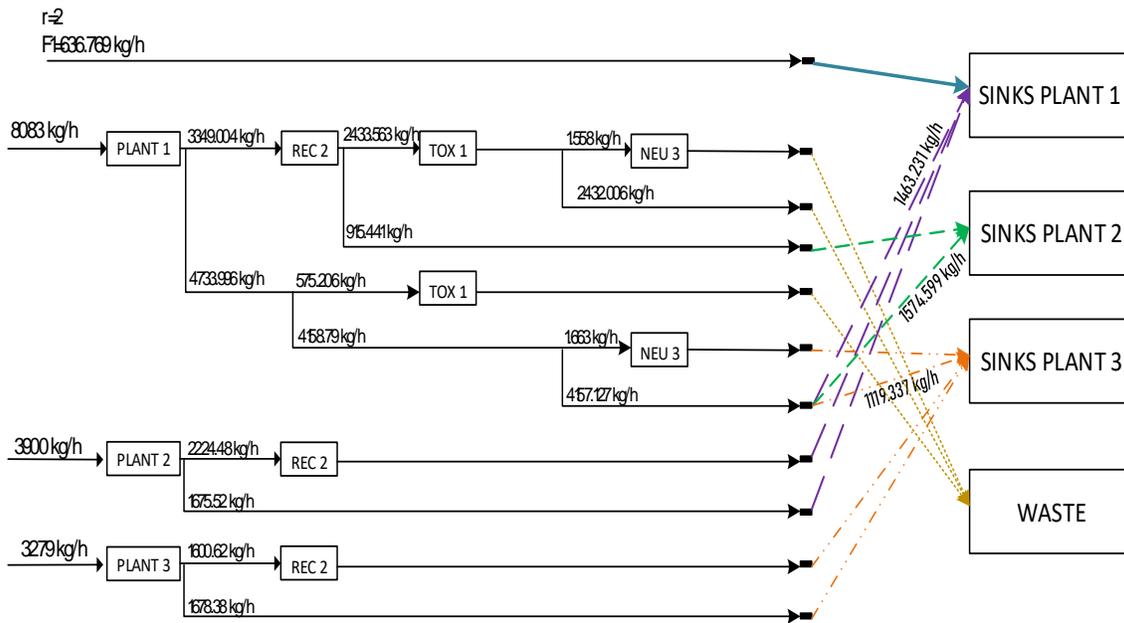


Figura 10. Configuración óptima para el escenario A con integración entre plantas.

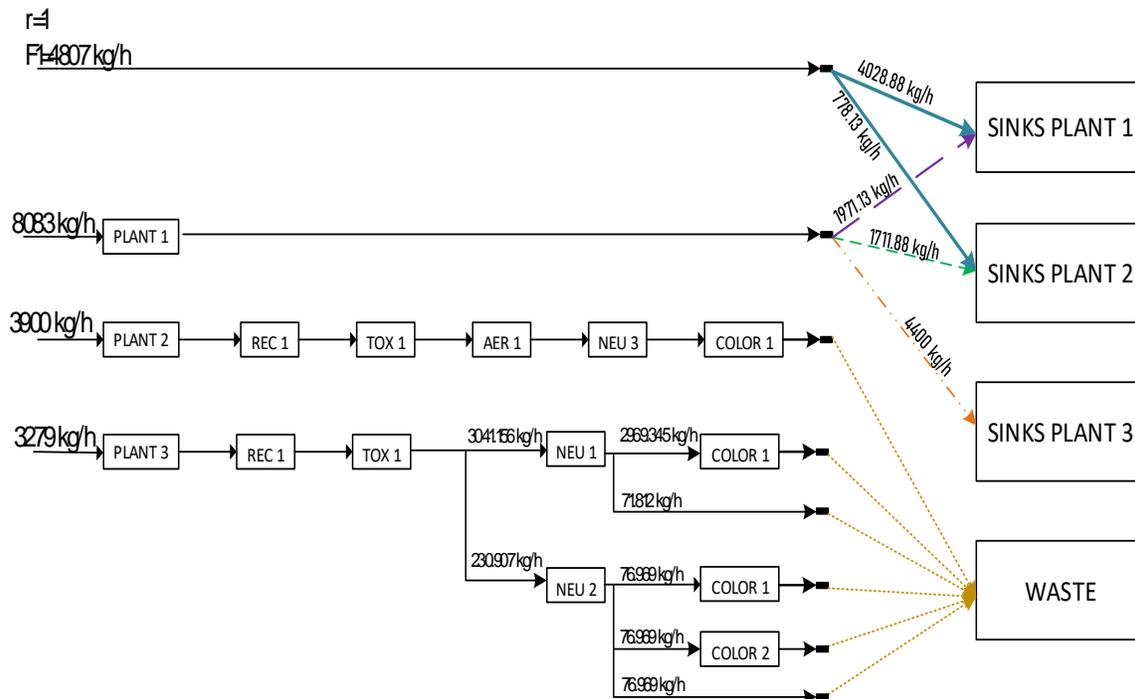


Figura 11. Configuración óptima para el escenario B con integración entre plantas.



**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

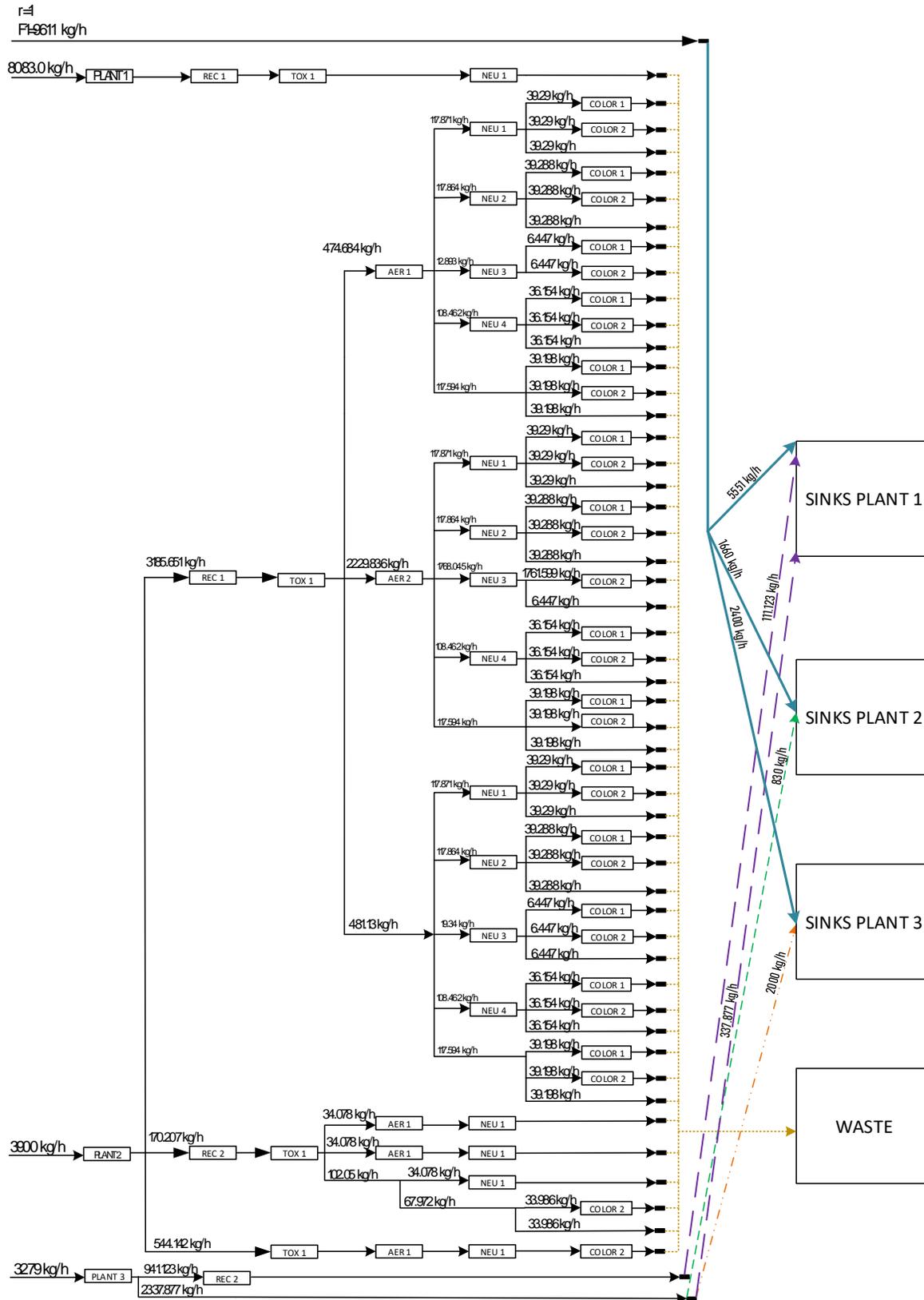


Figura 13. Configuración óptima para el escenario D con integración entre plantas.

## **CASO 2**

El problema asociado a este caso de estudio cuenta con 41,784 variables y 5416 restricciones, y es resuelto en un promedio de 44.57s de CPU en una computadora con un procesador Intel Celeron a 2.16GHz y de 4.00GB RAM. Al resolver en la plataforma de optimización GAMS 30.2.0 se obtienen los resultados que a continuación se discuten.

En este caso serán empleados los esquemas de justicia discutidos en el trabajo. Primeramente, se resolverá el problema minimizando el costo total, o bien, bajo el enfoque de bienestar social. En seguida, se procede a resolver bajo los enfoques de Rawlsian y Nash.

Los datos de este caso nos muestran que las plantas están ordenadas de manera descendiente en cuanto al tamaño, la planta 3 es la más contaminada y a la que se le exige mayor reducción de contaminantes.

Como se muestra en la **Figura 12**, **Figura 13** y **Figura 14**, el consumo de agua fresca y descarga de agua de desecho se mantiene a 1kg/h, el enfoque que requiere más unidades de tratamiento es el de Rawlsian.

La distribución en cuanto a redes de agua es similar, sin embargo, como se puede observar en la **Figura 15**, existe una gran diferencia entre los costos bajo los diferentes esquemas de justicia considerados.

Los resultados obtenidos bajo los distintos enfoques son mostrados en la **Tabla 9**, sobresaliendo en ésta el costo utópico de cada planta en color azul, para así comparar cada esquema de justicia de manera análoga al caso anterior donde el centro del diagrama radial representa el 0% de insatisfacción para cada planta.

La **Figura 16** nos muestra qué tan alejado se encuentra el costo de una planta de su punto utópico, los valores son obtenidos de manera análoga al caso anterior, en el que se compara el valor resultante del esquema de justicia por planta con el mejor y peor escenario de dicha planta. Se logra observar que, bajo el esquema de bienestar de Nash se ven mayormente favorecidas las plantas 1 y 3, alejando a la planta 2 en mucho mayor medida de su punto utópico; bajo el esquema de bienestar social encontramos el mismo comportamiento; bajo el esquema de justicia de Rawlsian beneficia en menor medida a una planta sobre la otra. Por lo que una distribución más justa de los recursos bajo éste último

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

esquema. El esquema de bienestar de Rawlsian como se discutió con anterioridad suele beneficiar a la planta más pequeña, sin embargo, en este caso ésta planta tiene un valor cinco veces más grande de la composición del componente peligroso presentado en el problema comparado con la planta más grande y la que tiene mayor porcentaje de toxicidad.

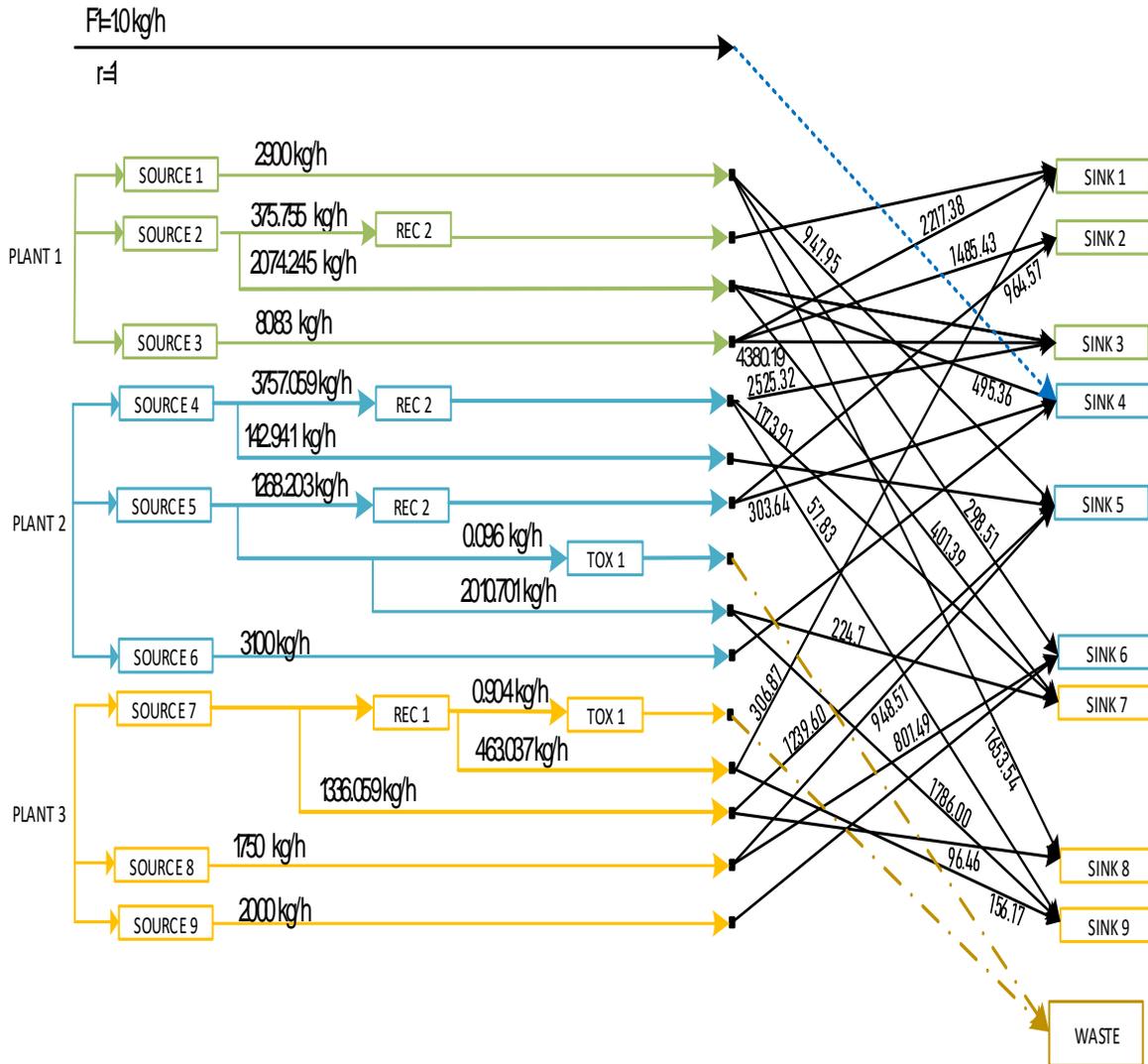


Figura 14. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar social del Caso 2. Todos los flujos tienen unidades de kg/h.

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

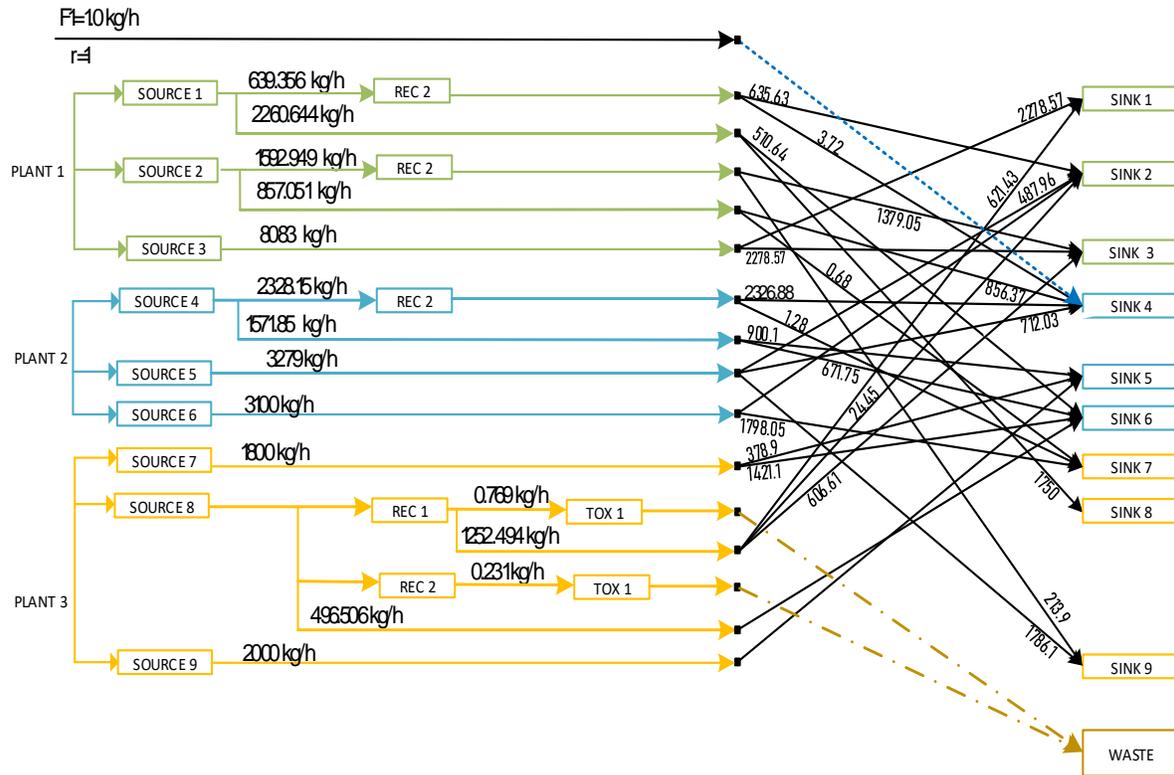


Figura 15. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Rawlsian del Caso 2. Todos los flujos tienen unidades de kg/h,

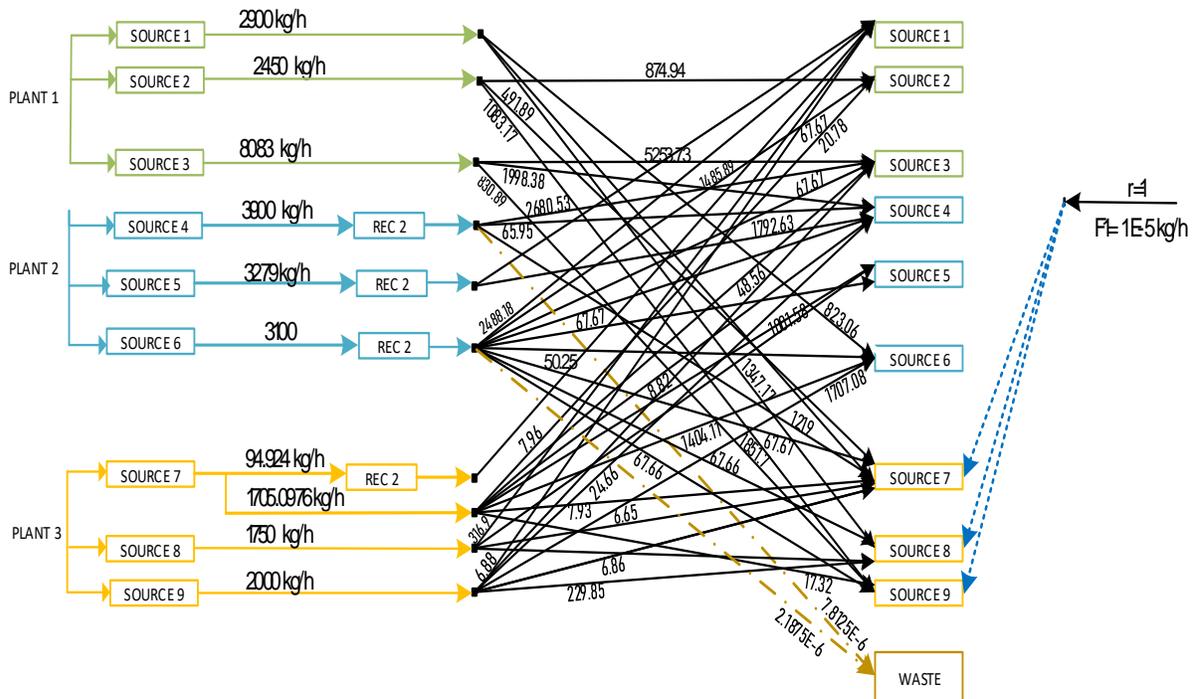


Figura 16. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Nash del Caso 2. Todos los flujos tienen unidades de kg/h. La fuente fresca se reparte en partes iguales a las plantas 7, 8 y 9.

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

***FUNCIÓN OBJETIVO***

	TOTALCOST (BIENESTAR SOCIAL)	COSTMIN PLANT 1	COSTMIN PLANT 2	COSTMIN PLANT 3	COSTMAYOR (RAWLSIAN)	COSTNASH (NASH)
<b>PLANTA 1</b>	15,657	16	7,326,500	,279,300	69,691	10,773
<b>PLANTA 2</b>	145,950	8,528,500	11	3,758,200	69,691	279,610
<b>PLANTA 3</b>	28,576	3,953,000	4,894,000	6	69,691	6,957
<b>COSTO TOTAL</b>	190,190	240,660	12,220,000	5,037,500	209,070	297,340

Tabla 9. Comparación de costos entre cada una de las funciones objetivo del Caso 2.

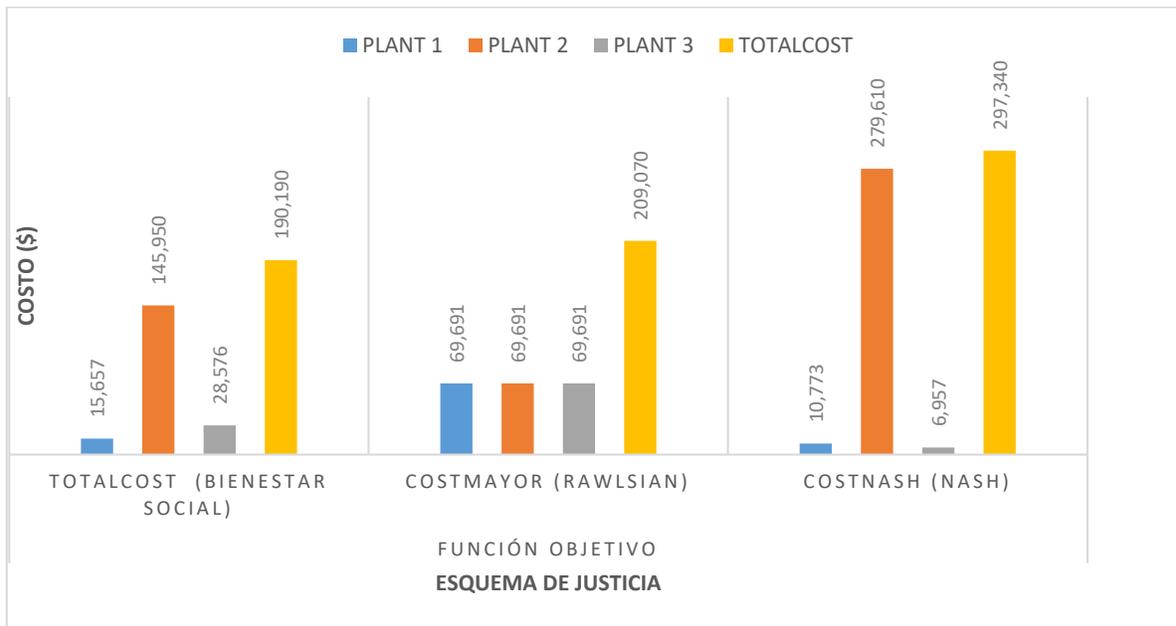
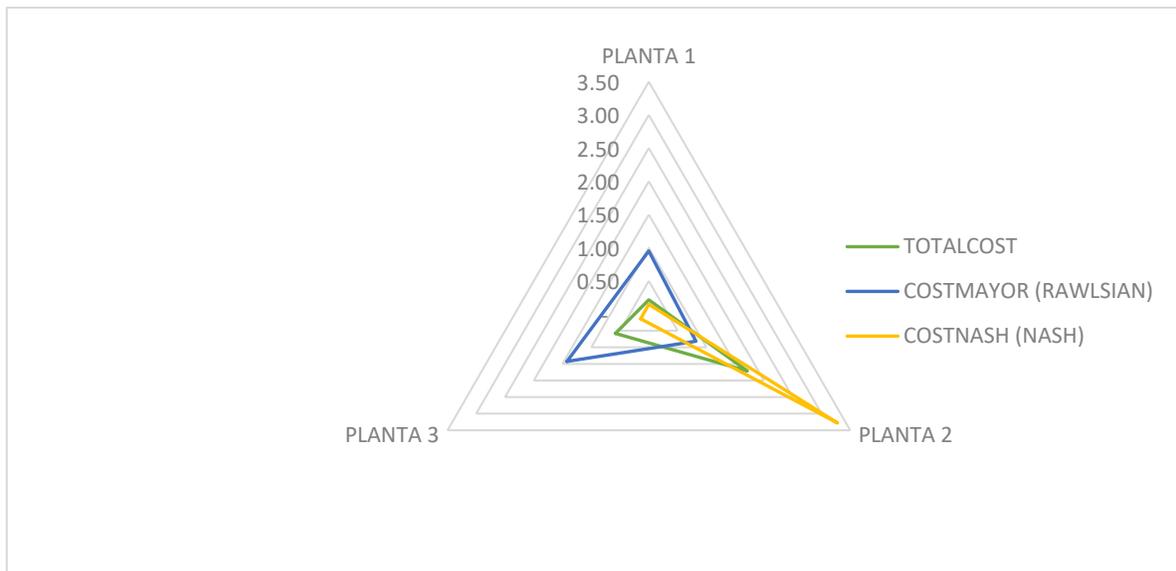


Figura 17. Representación de los costos bajo los distintos esquemas del Caso 2.



*Figura 18. Diagrama radial del Caso2.*

### **CASO 3**

El problema asociado a este caso de estudio cuenta con 41795 variables y 5419 restricciones, y es resuelto en un promedio de 12.3s de CPU en una computadora con un procesador Intel Celeron a 2.16GHz y de 4.00GB RAM. Al resolver en la plataforma de optimización GAMS 30.2.0 se obtienen los resultados que a continuación se discuten.

De manera análoga al caso anterior, se obtiene una solución para cada esquema de justicia, comenzando por el de bienestar social, seguido por el de bienestar de Rawlsian y finalmente el de bienestar de Nash.

Para este caso, las plantas están ordenadas de manera ascendente en cuanto al tamaño, las fuentes del proceso más contaminadas son las provenientes de la planta 2. Sin embargo, la diferencia de tamaño no es tan significativa como en los casos de estudio anteriores.

La **Figuras 17, 18 y 19** muestran las soluciones obtenidas bajo los distintos enfoques. Se alcanza un mejor aprovechamiento de los recursos bajo los esquemas de Nash y de bienestar social, debido a la casi nula demanda de fuentes frescas, mientras que para el caso del esquema de bienestar de Rawlsian la demanda de recursos frescos aumenta. Como se observa en la **Figura 20**, para éste caso, los resultados obtenidos bajo los enfoques de bienestar social y de Nash son muy similares, mientras que para el enfoque de Rawlsian encontramos un comportamiento distinto, en que el costo de las plantas llega a ser el mismo.

La **Tabla 10** muestra los resultados obtenidos usando la formulación para la integración entre plantas, bajo los distintos enfoques, resaltando en esta el punto utópico de cada planta en color azul, para así comparar cada esquema de justicia.

La comparación entre los puntos utópicos con los costos obtenidos bajo cada esquema de justicia, son presentados en la **Figura 21**, donde se puede apreciar que bajo el enfoque de bienestar social y de bienestar de Nash se obtienen resultados muy similares, donde a su vez no se beneficia a una planta sobre la otra. Por lo que para esta planta cualquiera de los dos enfoques nos proporcionará una distribución justa de los recursos.

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

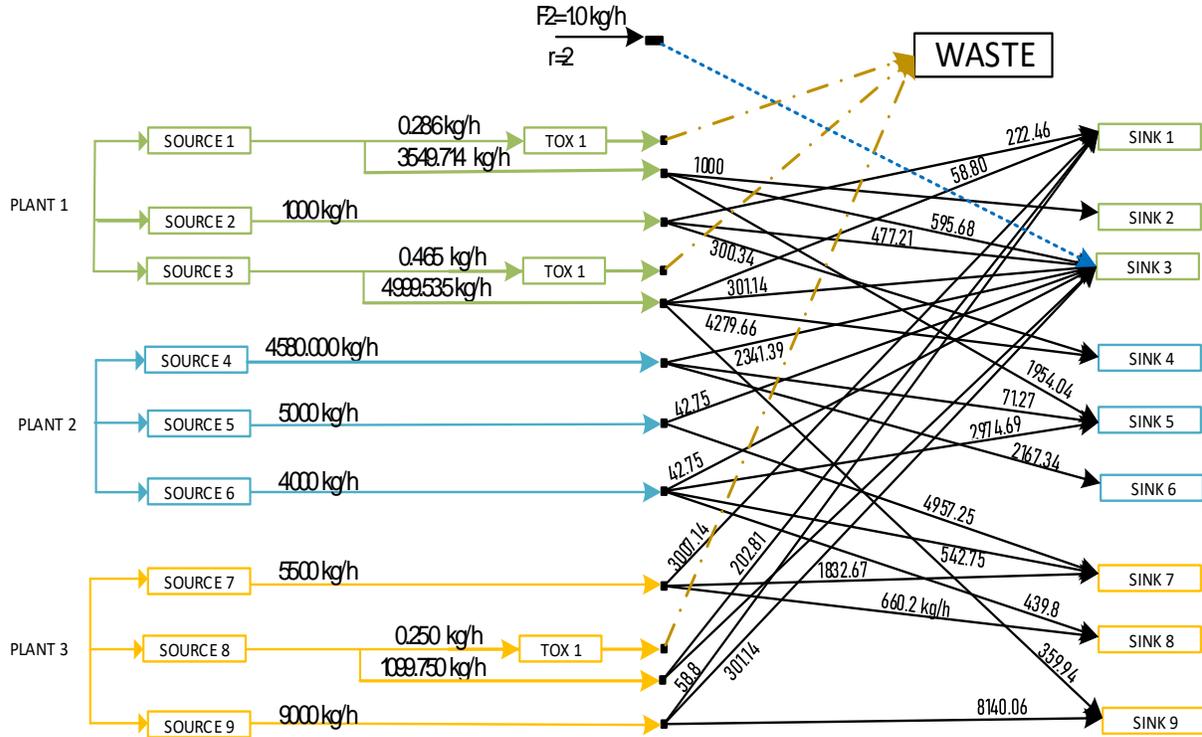


Figura 19. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Nash del Caso 3. Todos los flujos tienen unidades de kg/h.

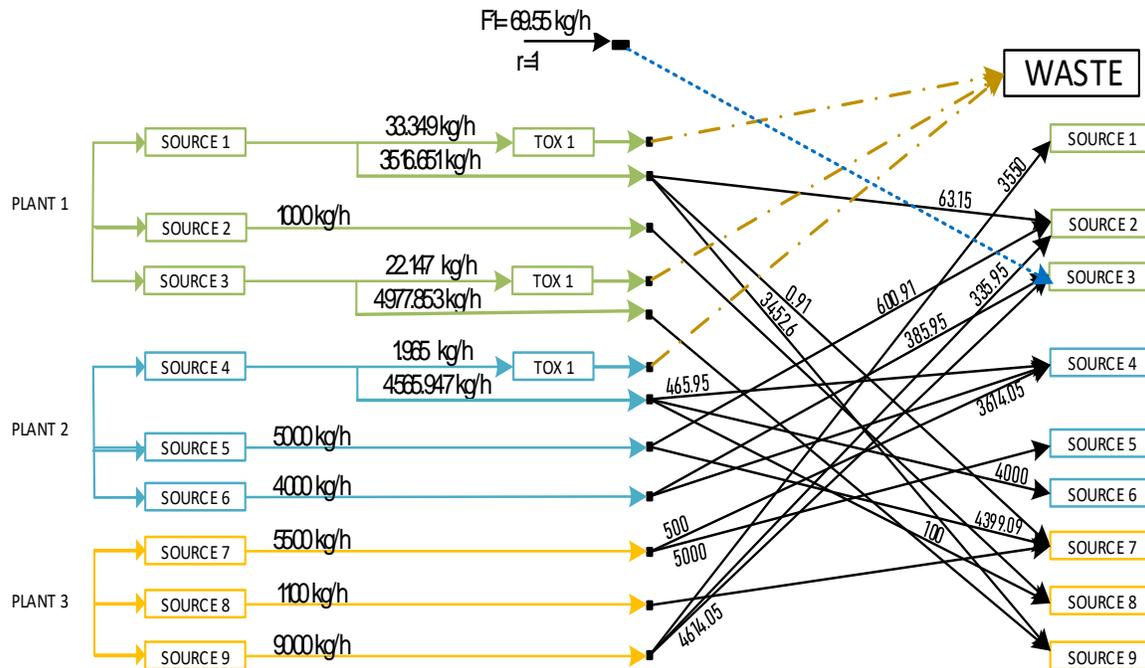


Figura 20. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar de Rawlsian del Caso 3. Todos los flujos tienen unidades de kg/h.

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

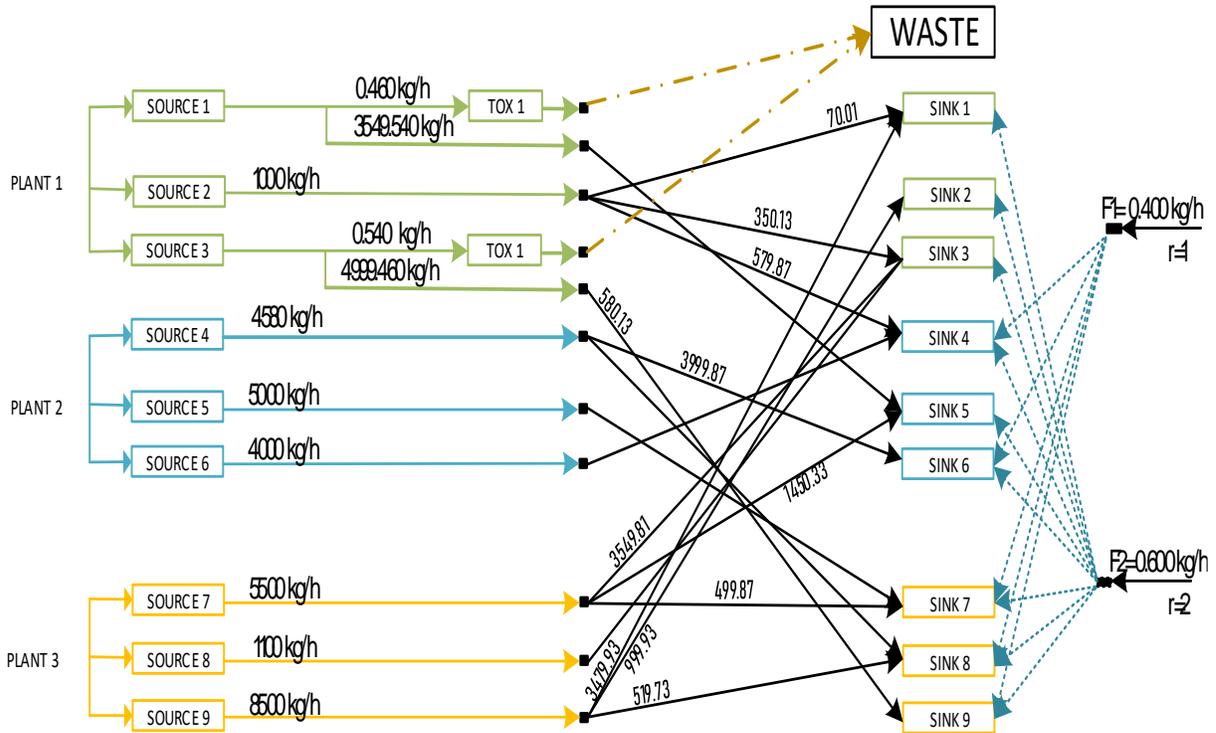


Figura 21. Solución óptima bajo el enfoque de bienestar social del Caso 3. Todos los flujos tienen unidades de kg/h, las fuentes frescas de lado derecho son divididas en partes iguales, siendo 0.08 y 0.066 kg/h para las fuentes frescas 1 y 2 respectivamente.

	<b>FUNCIÓN OBJETIVO</b>					
	TOTALCOST (SOCIAL WELFARE)	COSTMIN PLANT 1	COSTMIN PLANT 2	COSTMIN PLANT 3	COSTMAYOR (RAWLSIAN)	COSTNASH (NASH)
<b>PLANTA 1</b>	7,738	11	11,200,000	7,480,000	12,054	7,658
<b>PLANTA 2</b>	10,890	11,200,000	15	13,100,000	12,054	10,891
<b>PLANTA 3</b>	12,109	13,400,000	13,900,000	17	12,054	12,189
<b>COSTO TOTAL</b>	30,738	24,600,000	25,100,000	20,500,000	36,163	30,739

Tabla 10. Costos por planta y totales bajo diferentes funciones objetivo.

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

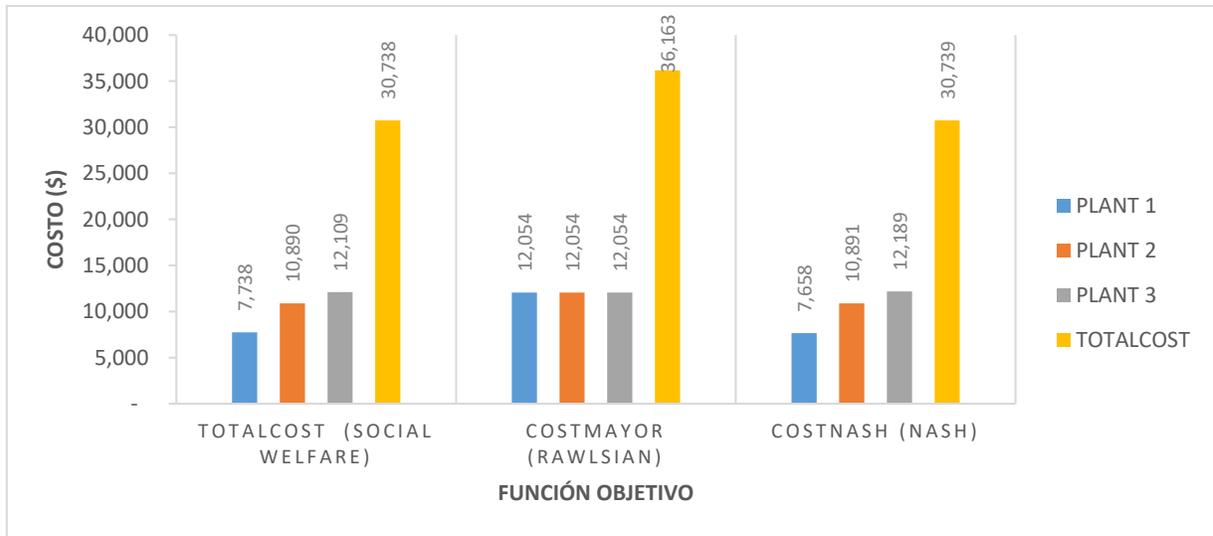


Figura 22. Representación de los costos bajo los distintos esquemas (caso 3).

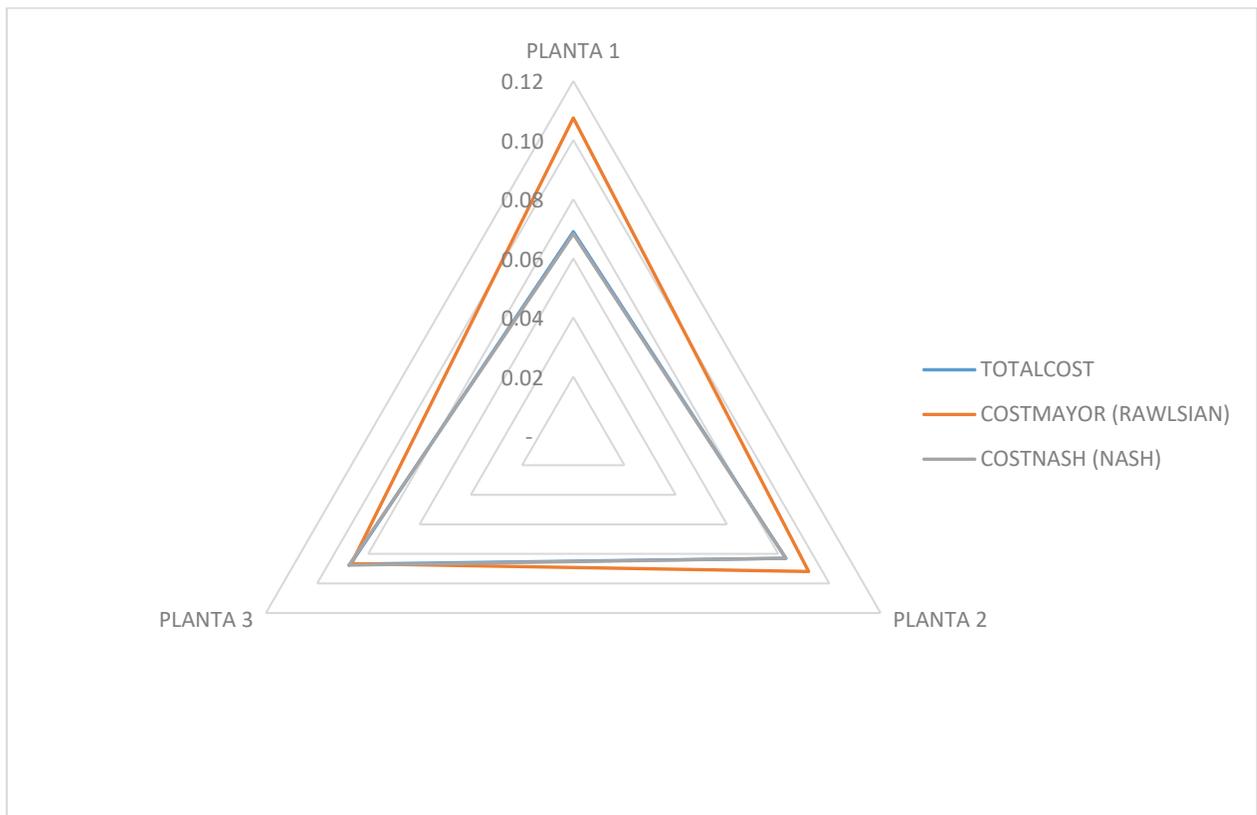


Figura 23. Diagrama radial del caso 3.

## **5. CONCLUSIONES**

En este trabajo de Tesis se ha propuesto un modelo matemático de optimización para la síntesis de redes de agua en parques eco-industriales considerando la distribución justa de los recursos. El modelo propuesto involucra costos de tubería y bombeo, tratamiento de las fuentes de descarga de distintas plantas a través de interceptores de propiedad y la distribución justa de la misma dentro del parque eco-industrial, así como el manejo óptimo de agua de las fuentes frescas y minimización de descargas de fuentes residuales. El modelo propuesto permite considerar restricciones en el flujo, composición y propiedades diversas de las corrientes de agua consideradas. La formulación matemática está basada en una superestructura que permite la formulación de un modelo matemático quasiconvexo, el cual es fácil de resolver con las herramientas de optimización disponibles en las plataformas comerciales.

Se presentaron varios casos de estudio para mostrar la aplicabilidad de la estrategia propuesta. Los resultados muestran que es complicado mantener a todas las plantas cerca de su punto utópico, y al incorporar los esquemas de justicia en el diseño de las redes de intercambio de agua se puede observar mediante los diagramas radiales qué tanto se aleja cada usuario de este valor, contemplando soluciones que nos muestran cómo se favorece más a ciertas plantas de acuerdo al esquema de justicia incorporado.

Con base en los resultados obtenidos y reportados y de acuerdo al código desarrollado en GAMS®, se observa lo siguiente:

- El esquema de bienestar de Rawlsian suele beneficiar a la planta más pequeña, sin embargo, cuando ésta presenta una gran cantidad de contaminantes, deja de favorecerle, siendo bajo este contexto cuando se obtiene una mejor distribución de los recursos bajo este esquema.
- El esquema social tiende a favorecer a las plantas de mayor tamaño, sin dar importancia a las plantas pequeñas.
- El esquema de Nash trata de asignarle mayor costo a las plantas más grandes y menor a las más chicas, cuando no hay mucha diferencia entre el tamaño entre éstas distribuye de mejor manera los recursos entre las mismas.

## **DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

Para trabajo futuro se deberán incorporar nuevos esquemas matemáticos de distribución justa de recursos. Además, se deben incorporar modelos detallados de las unidades de tratamiento. Así mismo, la interrelación entre las propiedades involucradas se debe incorporar en el modelo matemático.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ❖ Aguilar-Oropeza, G., Rubio-Castro, E., & Ponce-Ortega, J. M. (2019). Involving Acceptability in the Optimal Synthesis of Water Networks in Eco-Industrial Parks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(6), 2268-2279. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b04419
- ❖ Alnouri, S. Y., Linke, P., Bishnu, S., & El-Halwagi, M. M. (2018). Synthesis of interplant water networks using principal pipes. Part 1: Network representation. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2(4), 413-434. DOI: 10.1007/s41660-018-0062-1.
- ❖ Aviso, K. B., Tan, R. R., & Culaba, A. B. (2010). Designing eco-industrial water exchange networks using fuzzy mathematical programming. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 12(4), 353-363. DOI: 10.1007/s10098-009-0252-1.
- ❖ Alnouri, S. Y., Linke, P., & El-Halwagi, M. M. (2016). Synthesis of industrial park water reuse networks considering treatment systems and merged connectivity options. *Computers & Chemical Engineering*, 91, 289-306. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2016.02.003
- ❖ Chew, I. M., Foo, D. C., & Tan, R. R. (2010). Flowrate targeting algorithm for interplant resource conservation network. Part 2: assisted integration scheme. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(14), 6456-6468. DOI: 10.1021/ie901804z
- ❖ Dhole, V. R., Ramchandani, N., Tainsh, R. A., & Wasilewski, M. (1996). Make your process water pay for itself. *Chemical Engineering*, 103(1), 100.
- ❖ Ehrenfeld, J., & Gertler, N. (1997). Industrial ecology in practice: the evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, 1(1), 67-79. DOI: 10.1162/jiec.1997.1.1.67
- ❖ El-Halwagi, M. M., Gabriel, F., & Harell, D. (2003). Rigorous graphical targeting for resource conservation via material recycle/reuse networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 42(19), 4319-4328. DOI: 10.1021/ie030318a
- ❖ El-Halwagi, M. M., Glasgow, I. M., Qin, X., & Eden, M. R. (2004). Property integration: Componentless design techniques and visualization tools. *AIChE Journal*, 50(8), 1854-1869. DOI: 10.1002/aic.10305

- ❖ Hallale, N. (2002). A new graphical targeting method for water minimisation. *Advances in Environmental Research*, 6(3), 377-390. DOI: 10.1016/S1093-0191(01)00116-2
- ❖ Herrero, L. M. J., Lagüela, E. P., Capilla, A. V., Delgado, A. V., Cerdá, E., Larruga, F. J. S., ... & Villanueva, B. (2020). *Economía Circular-Espiral: Transición hacia un metabolismo económico cerrado*. (pág. 127) ECOBOOK.
- ❖ Karuppiah, R., & Grossmann, I. E. (2006). Global optimization for the synthesis of integrated water systems in chemical processes. *Computers & Chemical Engineering*, 30(4), 650-673. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2005.11.005
- ❖ Fadzil, A. F. A., Alwi, S. R. W., Manan, Z., & Klemeš, J. J. (2018). Industrial site water minimisation via one-way centralised water reuse header. *Journal of Cleaner Production*, 200, 174-187. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.193
- ❖ Feng, X., Bai, J., & Zheng, X. (2007). On the use of graphical method to determine the targets of single-contaminant regeneration recycling water systems. *Chemical Engineering Science*, 62(8), 2127-2138. DOI: 10.1016/j.ces.2006.12.081
- ❖ Gabriel, F. B., & El-Halwagi, M. M. (2005). Simultaneous synthesis of waste interception and material reuse networks: problem reformulation for global optimization. *Environmental Progress*, 24(2), 171-180. DOI: 10.1002/ep.10081
- ❖ Ibrić, N., Ahmetović, E., Kravanja, Z., Maréchal, F., & Kermani, M. (2017). Synthesis of single and interplant non-isothermal water networks. *Journal of Environmental Management*, 203, 1095-1117. DOI: 10.1016/j.jenvman.2017.05.001
- ❖ Kheireddine, H., Dadmohammadi, Y., Deng, C., Feng, X., & El-Halwagi, M. (2011). Optimization of direct recycle networks with the simultaneous consideration of property, mass, and thermal effects. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 50(7), 3754-3762. DOI: 10.1021/ie1012272
- ❖ Kuo, W. C. J., & Smith, R. (1997). Effluent treatment system design. *Chemical Engineering Science*, 52(23), 4273-4290. DOI: 10.1016/S0009-2509(97)00186-3
- ❖ Leong, Y. T., Lee, J. Y., Tan, R. R., Foo, J. J., & Chew, I. M. L. (2017). Multi-objective optimization for resource network synthesis in eco-industrial parks using an integrated analytic hierarchy process. *Journal of Cleaner Production*, 143, 1268-1283. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.147

- ❖ Liao, Z. W., Wu, J. T., Jiang, B. B., Wang, J. D., & Yang, Y. R. (2007). Design methodology for flexible multiple plant water networks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 46(14), 4954-4963. DOI: 10.1021/ie061299i
- ❖ Liu, L., Song, H., Zhang, L., & Du, J. (2018). Heat-integrated water allocation network synthesis for industrial parks with sequential and simultaneous design. *Computers & Chemical Engineering*, 108, 408-424. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.10.002
- ❖ Liu, L., Wang, J., Song, H., Du, J., & Yang, F. (2017). Multi-period water network management for industrial parks considering predictable variations. *Computers & Chemical Engineering*, 104, 172-184. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.04.015
- ❖ López-Díaz, D. C., Lira-Barragán, L. F., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Synthesis of eco-industrial parks interacting with a surrounding watershed. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3(7), 1564-1578. DOI: 10.1021/acssuschemeng.5b00276
- ❖ Lovelady, E. M., El-Halwagi, M., & Krishnagopalan, G. A. (2007). An integrated approach to the optimisation of water usage and discharge in pulp and paper plants. *International Journal of Environment and Pollution*, 29(1-3), 274-307. DOI: 10.1504/IJEP.2007.012807
- ❖ Lowe, E. A. (1997). Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2), 57-65. DOI: 10.1016/S0959-6526(97)00017-6
- ❖ u, B., Huang, S., & Grossmann, I. E. (2017). Optimal synthesis and operation of wastewater treatment process with dynamic influent. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 56(30), 8663-8676. DOI: 10.1021/acs.iecr.7b01805
- ❖ Manan, Z. A., Tan, Y. L., & Foo, D. C. Y. (2004). Targeting the minimum water flow rate using water cascade analysis technique. *AIChE Journal*, 50(12), 3169-3183. DOI: 10.1002/aic.10235
- ❖ Ng, D. K. S., Foo, D. C. Y., Rabie, A., & El-Halwagi, M. M. (2008). Simultaneous synthesis of property-based water reuse/recycle and interception networks for batch processes. *AIChE Journal*, 54(10), 2624-2632. DOI: 10.1002/aic.11578
- ❖ Ng, D. K. S., Foo, D. C. Y., & Tan, R. R. (2009). Automated targeting technique for single-impurity resource conservation networks. Part 1: direct reuse/recycle.

- Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(16), 7637-7646. DOI: 10.1021/ie900120y
- ❖ Olesen, S. G., & Polley, G. T. (1996). Dealing with plant geography and piping constraints in water network design. *Process Safety and Environmental Protection*, 4(74), 273-276. DOI:10.1205/095758296528626
  - ❖ Pinzón Latorre, A. (2009). La simbiosis industrial en Kalundborg, Dinamarca. *Dearq. Revista de Arquitectura*, (4), 155-161.
  - ❖ Piqueras, V. Y. (12 de febrero de 2013). poliBlogs. Obtenido de <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/programacion-matematica/>
  - ❖ Ponce-Ortega, J. M., El-Halwagi, M. M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2010). Global optimization for the synthesis of property-based recycle and reuse networks including environmental constraints. *Computers & Chemical Engineering*, 34(3), 318-330. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2009.10.005
  - ❖ Ponce-Ortega, J. M., Hortua, A. C., El-Halwagi, M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2009). A property-based optimization of direct recycle networks and wastewater treatment processes. *AIChE Journal*, 55(9), 2329-2344. DOI: 10.1002/aic.11828
  - ❖ Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Nápoles-Rivera, F., El-Halwagi, M. M., Serna-González, M., & Jiménez-Gutiérrez, A. (2010). Water integration of eco-industrial parks using a global optimization approach. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49(20), 9945-9960. DOI: 10.1021/ie100762u
  - ❖ Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., El-Halwagi, M. M., & Pham, V. (2013). Global optimization in property-based interplant water integration. *AIChE Journal*, 59(3), 813-833. DOI: 10.1002/aic.13874
  - ❖ Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., 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. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2012.05.004
  - ❖ Sotelo-Pichardo, C., Bamufleh, H. S., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2014). Optimal synthesis of property-based water networks considering growing demand projections. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(47), 18260-18272. DOI: 10.1021/ie503127p

- ❖ Sorin, M., & Bedard, S. (1999). The global pinch point in water reuse networks. *Process Safety and Environmental Protection*, 77(5), 305-308. DOI: 10.1205/095758299530189
- ❖ Tiu, B. T. C., & Cruz, D. E. (2017). An MILP model for optimizing water exchanges in eco-industrial parks considering water quality. *Resources, Conservation & Recycling*, 119, 89-96. DOI: 10.1016/j.resconrec.2016.06.005
- ❖ Wang, Y. P., & Smith, R. (1994). Wastewater minimisation. *Chemical Engineering Science*, 49(7), 981-1006. DOI: 10.1016/0009-2509(94)80006-5
- ❖ Zhang, K., Zhao, Y., Cao, H., & Wen, H. (2018). Multi-scale water network optimization considering simultaneous intra-and inter-plant integration in steel industry. *Journal of Cleaner Production*, 176, 663-675. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.158

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

## ANEXOS

### CÓDIGO DE GAMS

§TITLE OPTIMAL DESIGN OF WATER NETWORKS IN ECO-INDUSTRIAL PARKS - CASO 2

OPTION OPTCR=0.0010;

OPTION OPTCA=.010;

OPTION ITERLIM=10000000;

OPTION RESLIM=10000000;

OPTION MIP = CPLEX;

OPTION LP = CPLEX;

OPTION NLP = CONOPT;

OPTION MINLP =DICOPT;

OPTION SYSOUT=ON;

§ONEMPTY;

SETS

PP	TOTAL NUMBER OF PLANTS	/1*3/
I	NUMBER OF PROCESS SOURCES	/1*9/
I1(I)	SOURCES FROM PLANT 1	/1*3/
I2(I)	SOURCES FROM PLANT 2	/4*6/
I3(I)	SOURCES FROM PLANT 3	/7*9/
J	NUMBER OF PROCESS SINKS	/1*9/
J1(J)	SINKS FROM PLANT 1	/1*3/
J2(J)	SINKS FROM PLANT 2	/4*6/
J3(J)	SINKS FROM PLANT 3	/7*9/
R	NUMBER OF FRESH SOURCES	/1/
P	PROPERTIES	
/COMP, TOX, THOD, PH, COLOR, DENSITY, VISCOSITY/		
PINT(P)	PROPERTIES INTERCEPTED	/COMP, TOX, THOD, PH, COLOR/
PNINT(P)	PROPERTIES NOT INTERCEPTED	/DENSITY, VISCOSITY/
INT1	INTERCEPTORS FOR THE RECOVERY OF POLLUTANTS	/REC1, REC2, REC3/
INT2	INTERCEPTORS FOR THE TOXICITY	/TOX1, TOX2, TOX3/
INT3	INTERCEPTORS FOR THE AERATION	/AER1, AER2, AER3/
INT4	INTERCEPTORS FOR THE NEUTRALIZATION BASE	/NEU1, NEU2, NEU3, NEU4, NEU5/
INT5	INTERCEPTORS FOR THE COLOR	/COLOR1, COLOR2, COLOR3/
PSINKMAX(P)	PROPERTIES CONSTRAINED BY THE SINKS MAXIMUM	/COMP, PH, DENSITY, VISCOSITY/

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

PSINKMIN(P) PROPERTIES CONSTRAINED BY THE SINKS MINIMUM /PH,DENSITY, VISCOSITY/  
 PSINK(P) PROPERTY CONSTRAINED IN THE PROCESS SINKS /COMP,PH,DENSITY,VISCOSITY/  
 PENVMAX(P) PROPERTIES CONSTRAINED BY THE ENVIRONEMNT /COMP,TOX,PH,THOD,COLOR/  
 PENVMIN(P) PROPERTIES CONSTRAINED BY THE ENVIRONMENT /PH/  
 PWASTE(P) PROPERTIES CONSTRAINED BY THE ENVIRONMENT /COMP,TOX,PH,THOD,COLOR/;

\*

PARAMETER HY OPERATIONAL TIME OF THE PLANT HR BY YEAR /8000/;

PARAMETER WSOURCE(I) SOURCES FLOWRATES

/1	2900
2	2450
3	8083
4	3900
5	3279
6	3100
7	1800
8	1750
9	2000/;

PARAMETER GSINK(J) SINKS FLOWRATES

/1	2900
2	2450
3	8083
4	3900
5	3279
6	3100
7	1800
8	1750
9	2000/;

TABLE PINSOURCE(I,P) IN SOURCE PROPERTIES

	COMP	TOX	THOD	PH	COLOR	DENSITY	VISCOSITY
1	0.033	1.8	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0
2	0.022	0.5	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0
3	0.016	2.3	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0
4	0.024	1.5	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0
5	0.022	1.5	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0
6	0.010	0.75	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0
7	0.160	1.4	0.000	6.9	0.0000	1.8	1.0

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

```

8      0.100  1.75  0.000  6.9  0.0000  1.8      1.0
9      0.110  1.3   0.000  6.9  0.0000  1.8      1.0;

```

TABLE PINSINKMAX(J,PSINKMAX) IN SINKS CONSTRAINTS MAXIMUM

```

      COMP  PH    DENSITY  VISCOSITY
1      0.013  9.0   1.8     1.202
2      0.011  9.0   1.8     2.230
3      0.013  9.0   1.8     1.260
4      0.011  9.0   1.8     1.202
5      0.100  9.0   1.8     2.230
6      0.100  9.0   1.8     1.260
7      0.010  9.0   1.8     1.202
8      0.040  9.0   1.8     2.230
9      0.020  9.0   1.8     1.260;

```

TABLE PINSINKMIN(J,PSINKMIN) IN SINKS CONSTRAINTS MINIMUM

```

      PH    DENSITY  VISCOSITY
1      5.0   2.5     0.900
2      5.0   2.5     0.905
3      5.0   2.5     0.903
4      5.0   2.5     0.900
5      5.0   2.5     0.905
6      5.0   2.5     0.903
7      5.0   2.5     0.900
8      5.0   2.5     0.905
9      5.0   2.5     0.903;

```

TABLE PINFRESH(R,P) IN FRESH SOURCE PROPERTIES

```

      COMP  TOX  THOD  PH    COLOR  DENSITY  VISCOSITY
1      0.00  0.0  0.00  7.0   0.0000  2.204   1.002;

```

PARAMETER CONSENSVMAX(PENVMAX) MAXIMUM ENVIRONMENTAL CONSTRAINT

```

/COMP  0.005
TOX    0.000
PH     9.0
THOD   75
COLOR  300/;

```

PARAMETER CONSENSVMIN(PENVMIN) MINIMUM ENVIRONMENTAL CONSTRAINT

```

/PH    5.5/;

```

PARAMETER ALFA(P,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5) EFFICIENCY FOR PROPERTY INTERCEPTION INT

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

```

/
COMP . REC1 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU1*NEU5 . COLOR1*COLOR3      0.98
COMP . REC2 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU1*NEU5 . COLOR1*COLOR3      0.85
TOX . REC1*REC3 . TOX1 . AER1*AER3 . NEU1*NEU5 . COLOR1*COLOR3      1.00
TOX . REC1*REC3 . TOX2 . AER1*AER3 . NEU1*NEU5 . COLOR1*COLOR3      0.90
THOD . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1 . NEU1*NEU5 . COLOR1*COLOR3      0.80
THOD . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER2 . NEU1*NEU5 . COLOR1*COLOR3      0.55
PH . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU1 . COLOR1*COLOR3        0.50
PH . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU2 . COLOR1*COLOR3        0.30
PH . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU3 . COLOR1*COLOR3       -0.50
PH . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU4 . COLOR1*COLOR3       -0.30
COLOR . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU1*NEU5 . COLOR1        0.90
COLOR . REC1*REC3 . TOX1*TOX3 . AER1*AER3 . NEU1*NEU5 . COLOR2      0.80/;

```

\*

```

PARAMETER POUTPIN(I,P,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5) OUT PIN PREPerty FOR STREAM I;

```

```

POUTPIN(I,PNINT,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=PINSOURCE(I,PNINT);

```

```

POUTPIN(I,PINT,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=(1-
ALFA(PINT,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5))*PINSOURCE(I,PINT);

```

\*

```

PINSOURCE(I,'PH')=10**PINSOURCE(I,'PH');

```

```

PINSOURCE(I,'COLOR')=PINSOURCE(I,'COLOR')**0.606;

```

```

PINSOURCE(I,'DENSITY')=1/PINSOURCE(I,'DENSITY');

```

```

PINSOURCE(I,'VISCOSITY')=LOG10(PINSOURCE(I,'VISCOSITY'));

```

\*

```

PINSINKMAX(J,'PH')=10**PINSINKMAX(J,'PH');

```

```

PINSINKMAX(J,'DENSITY')=1/PINSINKMAX(J,'DENSITY');

```

```

PINSINKMAX(J,'VISCOSITY')=LOG10(PINSINKMAX(J,'VISCOSITY'));

```

\*

```

PINSINKMIN(J,'PH')=10**PINSINKMIN(J,'PH');

```

```

PINSINKMIN(J,'DENSITY')=1/PINSINKMIN(J,'DENSITY');

```

```

PINSINKMIN(J,'VISCOSITY')=LOG10(PINSINKMIN(J,'VISCOSITY'));

```

\*

```

PINFRESH(R,'PH')=10**PINFRESH(R,'PH');

```

```

PINFRESH(R,'COLOR')=PINFRESH(R,'COLOR')**0.606;

```

```

PINFRESH(R,'DENSITY')=1/PINFRESH(R,'DENSITY');

```

```

PINFRESH(R,'VISCOSITY')=LOG10(PINFRESH(R,'VISCOSITY'));

```

\*

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

```

CONSENVMAX('PH')=10**CONSENVMAX('PH');

CONSENVMAX('COLOR')=CONSENVMAX('COLOR')**0.606;

*

CONSENVMIN('PH')=10**CONSENVMIN('PH');

*

POUTPIN(I,'PH',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=10**POUTPIN(I,'PH',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5);

POUTPIN(I,'COLOR',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=POUTPIN(I,'COLOR',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)**0.606;

POUTPIN(I,'DENSITY',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=1/POUTPIN(I,'DENSITY',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5);

POUTPIN(I,'VISCOSITY',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=LOG10(POUTPIN(I,'VISCOSITY',INT1,INT2,INT3,INT4,INT5));

*

PARAMETER C1(INT1) COST FOR INTERCEPTORS INT1

/REC1      0.0065

REC2      0.0033

REC3      0/;

PARAMETER C2(INT2) COST FOR INTERCEPTORS INT2

/TOX1     0.0098

TOX2     0.0075

TOX3     0/;

PARAMETER C3(INT3) COST FOR INTERCEPTORS INT3

/AER1     0.0065

AER2     0.0032

AER3     0/;

PARAMETER C4(INT4) COST FOR INTERCEPTORS INT4

/NEU1     0.063

NEU2     0.018

NEU3     0.065

NEU4     0.019

NEU5     0/;

PARAMETER C5(INT5) COST FOR INTERCEPTORS INT5

/COLOR1   0.073

COLOR2   0.061

COLOR3   0/;

PARAMETER CF(R) COST FOR THE FRESH SOURCE R

/1        0.009/;

***NEW PARAMETERS DANIELA*****

```

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

PARAMETER UCPSOURINT (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) UNIT COST OF PIPES AND PUMPING FROM SOURCES TO INTERCEPTORS;

§ONTEXT

UCPSOURINT (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)

§OFFTEXT

UCPSOURINT (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)=1E-3;

PARAMETER UCPINTSINK (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) UNIT COST OF PIPES AND PUMPING FROM INTERCEPTORS TO SINKS;

UCPINTSINK (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)=1E-3;

PARAMETER UCPINTWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) PARAMET;

UCPINTWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)=1E-3;

PARAMETER UCFRESHSINK (R, J) UNIT COST OF PIPES AND PUMPING FROM FRESH SOURCES TO SINKS;

UCFRESHSINK (R, J)=1E-4;;

TABLE UCFRESH (R, J) UNITARY PIPING COST IN FRESH

	1	2	3
1	0.9	1.0	0.9

;

UCFRESH (R, J)=UCFRESH (R, J) \*1E-4;

PARAMETER TREATMENTINTSINK (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) UNITARY TREATMENT COST INT SINKS;

TREATMENTINTSINK (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)=1E-4;

PARAMETER TREATMENTINTSINKWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) UNITARY TREATMENT COST SOURCES WASTE;

TREATMENTINTSINKWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)=1E-4;

\*\*\*\*\*

VARIABLE

OBJECTIVE1 TOTAL ANNUAL COST

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

```

OBJECTIVE2                                ENVIRONMENTAL IMPACT
TOTALCOSTPLANT (PP)                       TOTAL COST PER PLANT
TOTALCOST                                  TOTAL COST
COSTMINPLANT                              MIN COST PER PLANT
COSTMAYOR                                  RAWLSIAN COST
COSTNASH                                   NASH COST;

POSITIVE VARIABLES

FFRESH (R)                                FRESH WATER FLOWRATE
F (R, J)                                   FRESH FROM R TO J
W1 (I, INT1)                              SEGREGATED FLOWRATE TO INTERCEPTORS INT1
W2 (I, INT1, INT2)                        SEGREGATED FLOWRATE TO INTERCEPTORS INT2
W3 (I, INT1, INT2, INT3)                  SEGREGATED FLOWRATE TO INTERCEPTORS INT3
W4 (I, INT1, INT2, INT3, INT4)           SEGREGATED FLOWRATE TO INTERCEPTORS INT4
W5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)     SEGREGATED FLOWRATE TO INTERCEPTORS INT5
POPINSINK (J, P)                          PROPERTY OPERATOR OVER PROPERTY P AT THE INLET TO SINK J
G (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)   FLOWRATE FROM THE PIN TO THE SINKS
GWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) FLOWRATE FROM PIN TO THE WASTE
WASTE                                      TOTAL WASTE
POPROPWASTE (P)                           PROPERTY OPERATOR OVER PROPERTY P IN THE WASTE STREAM
*NEW VARIABLES DANIELA*****
PIPECOSTSOURCEINT (I)                     PIPING AND PUMPING COST FROM SOURCES TO INTERCEPTORS
PIPECOSTINTSINK (J)                       PIPING AND PUMPING COST FROM INTERCEPTORS TO SINKS
PIPECOSTINTWASTE (I)                      PIPING AND PUMPING COST FROM INTERCEPTORS TO WASTE
PIPECOSTFRESHSINK (J)                     PIPING AND PUMPING COST FROM FRESH SOURCES TO SINKS
FRESHWATERCOST (J)                        TOTAL COST OF THE FRESH WATER
TREATMENTCOSTSINK (J)                     TREATMENT COST OF THE SINKS
TREATMENTCOSTWASTE (I)                    TREATMENT COST OF THE WASTE

*****

*NEW VARIABLES FOR THE RELAXED MODEL
B (PWASTE)                                BILINEAR TERM -POPRPWASTE (PWASTE) *WASTE
;
EQUATIONS
OBJ1                                       OBJECTIVE 1 COSTS
OBJ2                                       OBJECTIVE 2 ENVIRONMENTAL IMPACT

```

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

PARETO	RELAXATION PARETO
SEGFRESH (R)	SEGREGATION FOR THE FRESH SOURCES
SEGSOURCEINT1 (I)	SEGREGATION FOR INTERCEPTORS INT1
SEGSOURCEINT2 (I, INT1)	SEGREGATION FOR INTERCEPTORS INT2
SEGSOURCEINT3 (I, INT1, INT2)	SEGREGATION FOR INTERCEPTORS INT3
SEGSOURCEINT4 (I, INT1, INT2, INT3)	SEGREGATION FOR INTERCEPTORS INT4
SEGSOURCEINT5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4)	SEGREGATION FOR INTERCEPTORS INT5
SPLITPIN (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)	SPLITTING FOR THE PIN
MASSBALSINK (J)	MASS BALANCE AT THE MIXER PRIOR TO ANY SINK
PROPBALSINK (J, PSINK)	COMPONENT BALANCE AT THE MIXER PRIOR TO ANY SINK
MASBALWASTE	OVERAL MASS BALANCE FOR THE WASTE
PROPBALWASTE (PWASTE)	COMPONENT BALANCE FOR THE WASTE
MAXSINKCONST (J, PSINKMAX)	MAXIMUM SINKS CONSTRAINTS
MINSINKCONST (J, PSINKMIN)	MINIMUM SINKS CONSTRAINTS
MAXENVCONST (PENVMAX)	MAXIMUM ENVIRONMENT CONSTRAINTS
MINENVCONST (PENVMIN)	MINIMUM ENVIRONMENT CONSTRAINTS
*NEW EQUATIONS DANIELA*****	
EQ12 (I)	PIPE COST SOURCE INTERCEPTION
EQ13 (J)	PIPE COST INTERCEPTOR SINKS
EQ14 (I)	PIPE COST INTERCEPTOR WASTE
EQ15 (J)	PIPE COST FRESH SINK
EQ16 (J)	FRESH WATER COST
EQ17 (J)	TREATMENT SINKS COSTS
EQ18 (I)	TREATMENT WASTE COST
EQ19P1	COST PLANT 1
EQ19P2	COST PLANT 2
EQ19P3	COST PLANT 3
EQ20	TOTAL COST
EQ21	MIN COST PER PLANT
EQ22 (PP)	RAWLSIAN COST
EQ23 (PP)	NASH COST
*****	
*NEW UQUATIONS FOR THE RELAXED MODEL	
RELAXEDPROPBALWASTE (PWASTE)	RELAXED EQUATION FOR THE PROPBALWASTE
RELAXEDLOW1 (PWASTE)	CONVEX UNDERESTIMATOR 1

**DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO  
LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS**

---

```

RELAXEDLOW2 (PWASTE)          CONVEX UNDERESTIMATOR 2
RELAXEDUPP1 (PWASTE)         CONVEX UPPERESTIMATOR 1
RELAXEDUPP2 (PWASTE)         CONVEX UPPERESTIMATOR 2;
*****
*MODEL*****
*****
OBJ1 ..                        OBJECTIVE1=E=SUM(R, CF (R) *FFRESH (R) ) *HY +
                                HY*
                                SUM(I, SUM(INT1, C1 (INT1) *W1 (I, INT1)
                                +SUM(INT2, C2 (INT2) *W2 (I, INT1, INT2)
                                +SUM(INT3, C3 (INT3) *W3 (I, INT1, INT2, INT3)
                                +SUM(INT4, C4 (INT4) *W4 (I, INT1, INT2, INT3, INT4)
                                +SUM(INT5, C5 (INT5) *W5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ) ) ) ) ) );

SEGFRESH (R) ..              FFRESH (R) =E=SUM(J, F (R, J) );

SEGSOURCEINT1 (I) ..         WSOURCE (I) =E=SUM (INT1, W1 (I, INT1) );

SEGSOURCEINT2 (I, INT1) ..   W1 (I, INT1) =E=SUM (INT2, W2 (I, INT1, INT2) );

SEGSOURCEINT3 (I, INT1, INT2) .. W2 (I, INT1, INT2) =E=SUM (INT3, W3 (I, INT1, INT2, INT3) );

SEGSOURCEINT4 (I, INT1, INT2, INT3) ..
W3 (I, INT1, INT2, INT3) =E=SUM (INT4, W4 (I, INT1, INT2, INT3, INT4) );

SEGSOURCEINT5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4) ..
W4 (I, INT1, INT2, INT3, INT4) =E=SUM (INT5, W5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) );

SPLITPIN (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ..
W5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) =E=SUM (J, G (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ) +GWASTE (I, INT1, INT2, I
NT3, INT4, INT5) );

MASSBALSINK (J) ..          GSINK (J) =E=SUM ( (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) , G (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ) +SUM (R, F (R, J) );

PROPBALSINK (J, PSINK) ..   POPINSINK (J, PSINK) *GSINK (J) =E=SUM ( (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) , G (I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT
5) *POUTPIN (I, PSINK, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ) +SUM (R, F (R, J) *PINFRESH (R, PSINK) );

MASBALWASTE ..             SUM ( (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) , GWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ) =E=WASTE;

PROPBALWASTE (PWASTE) ..   SUM ( (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) , GWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) *POUTPIN (I, PWASTE, INT1, IN
T2, INT3, INT4, INT5) ) =E=WASTE*POPPOPWASTE (PWASTE) );

MAXSINKCONST (J, PSINKMAX) .. POPINSINK (J, PSINKMAX) =L=PINSINKMAX (J, PSINKMAX) ;

MINSINKCONST (J, PSINKMIN) .. POPINSINK (J, PSINKMIN) =G=PINSINKMIN (J, PSINKMIN) ;

MAXENVCONST (PENVMAX) ..   POPROPWASTE (PENVMAX) =L=CONSENVMAX (PENVMAX) ;

MINENVCONST (PENVMIN) ..   POPROPWASTE (PENVMIN) =G=CONSENVMIN (PENVMIN) ;
*****
EQ12 (I) ..                PIPECOSTSOURCEINT (I) =E=SUM ( (INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) , W5 (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) ) *UCPSOUR
INT (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) );

```

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

EQ13 (J) ..  
 $PIPECOSTINTSINK(J) = E = \text{SUM}(I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5), G(I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) * UCPINTSINK(I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5));$

EQ14 (I) ..  
 $PIPECOSTINTWASTE(I) = E = \text{SUM}(INT1, INT2, INT3, INT4, INT5), GWASTE(I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) * UCPI NTWASTE(I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5));$

EQ15 (J) ..  
 $PIPECOSTFRESHSINK(J) = E = \text{SUM}(R, F(R, J) * UCFRESHSINK(R, J));$

EQ16 (J) ..  
 $FRESHWATERCOST(J) = E = \text{SUM}(R, F(R, J) * UCFRESH(R, J));$

EQ17 (J) ..  
 $TREATMENTCOSTSINK(J) = E = \text{SUM}(I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5), G(I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) * TREATMENTINTSINK(I, J, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) * HY;$

EQ18 (I) ..  
 $TREATMENTCOSTWASTE(I) = E = \text{SUM}(INT1, INT2, INT3, INT4, INT5), GWASTE(I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) * TREATMENTINTSINKWASTE(I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) * HY;$

EQ19P1..

$TOTALCOSTPLANT('1') = E = \text{SUM}(I1, PIPECOSTSOURCEINT(I1)) + \text{SUM}(J1, PIPECOSTINTSINK(J1)) + \text{SUM}(I1, PIPECOSTINTWASTE(I1)) + \text{SUM}(J1, PIPECOSTFRESHSINK(J1)) + \text{SUM}(J1, FRESHWATERCOST(J1)) + \text{SUM}(J1, TREATMENTCOSTSINK(J1)) + \text{SUM}(I1, TREATMENTCOSTWASTE(I1)) +$   
 $HY * \text{SUM}(I1, \text{SUM}(INT1, C1(INT1) * W1(I1, INT1))$   
 $+ \text{SUM}(INT2, C2(INT2) * W2(I1, INT1, INT2))$   
 $+ \text{SUM}(INT3, C3(INT3) * W3(I1, INT1, INT2, INT3))$   
 $+ \text{SUM}(INT4, C4(INT4) * W4(I1, INT1, INT2, INT3, INT4))$   
 $+ \text{SUM}(INT5, C5(INT5) * W5(I1, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)) ) ) ) ) );$

EQ19P2..

$TOTALCOSTPLANT('2') = E = \text{SUM}(I2, PIPECOSTSOURCEINT(I2)) + \text{SUM}(J2, PIPECOSTINTSINK(J2)) + \text{SUM}(I2, PIPECOSTINTWASTE(I2)) + \text{SUM}(J2, PIPECOSTFRESHSINK(J2)) + \text{SUM}(J2, FRESHWATERCOST(J2)) + \text{SUM}(J2, TREATMENTCOSTSINK(J2)) + \text{SUM}(I2, TREATMENTCOSTWASTE(I2)) +$   
 $HY * \text{SUM}(I2, \text{SUM}(INT1, C1(INT1) * W1(I2, INT1))$   
 $+ \text{SUM}(INT2, C2(INT2) * W2(I2, INT1, INT2))$   
 $+ \text{SUM}(INT3, C3(INT3) * W3(I2, INT1, INT2, INT3))$   
 $+ \text{SUM}(INT4, C4(INT4) * W4(I2, INT1, INT2, INT3, INT4))$   
 $+ \text{SUM}(INT5, C5(INT5) * W5(I2, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)) ) ) ) ) );$

EQ19P3..

$TOTALCOSTPLANT('3') = E = \text{SUM}(I3, PIPECOSTSOURCEINT(I3)) + \text{SUM}(J3, PIPECOSTINTSINK(J3)) + \text{SUM}(I3, PIPECOSTINTWASTE(I3)) + \text{SUM}(J3, PIPECOSTFRESHSINK(J3)) + \text{SUM}(J3, FRESHWATERCOST(J3)) + \text{SUM}(J3, TREATMENTCOSTSINK(J3)) + \text{SUM}(I3, TREATMENTCOSTWASTE(I3)) +$   
 $HY * \text{SUM}(I3, \text{SUM}(INT1, C1(INT1) * W1(I3, INT1))$   
 $+ \text{SUM}(INT2, C2(INT2) * W2(I3, INT1, INT2))$   
 $+ \text{SUM}(INT3, C3(INT3) * W3(I3, INT1, INT2, INT3))$   
 $+ \text{SUM}(INT4, C4(INT4) * W4(I3, INT1, INT2, INT3, INT4))$   
 $+ \text{SUM}(INT5, C5(INT5) * W5(I3, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)) ) ) ) ) );$

EQ20..  
 $TOTALCOST = E = \text{SUM}(PP, TOTALCOSTPLANT(PP));$

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

```

EQ21..          COSTMINPLANT=E=TOTALCOSTPLANT('1');

EQ22 (PP) ..    COSTMAYOR=G=TOTALCOSTPLANT (PP);

EQ23 (PP) ..
COSTNASH=E=LOG10 (1+TOTALCOSTPLANT ('1')) +LOG10 (1+TOTALCOSTPLANT ('2')) +LOG10 (1+TOTALCOSTPLANT ('3'));

*NEW EQUATIONS FOR THE CONVEX RELAXED MODEL

RELAXEDPROPBALWASTE (PWASTE) ..
SUM (( I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5), GWASTE (I, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5) *POUTPIN (I, PWASTE, INT1, INT2, INT3, INT4, INT5)) =E=B (PWASTE);

RELAXEDUPP1 (PWASTE) ..
B (PWASTE) =G=POPPOPWASTE.LO (PWASTE) *WASTE+WASTE.LO*POPPOPWASTE (PWASTE) -
POPPOPWASTE.LO (PWASTE) *WASTE.LO;

RELAXEDUPP2 (PWASTE) ..
B (PWASTE) =G=POPPOPWASTE.UP (PWASTE) *WASTE+WASTE.UP*POPPOPWASTE (PWASTE) -
POPPOPWASTE.UP (PWASTE) *WASTE.UP;

RELAXEDLOW1 (PWASTE) ..
B (PWASTE) =L=POPPOPWASTE.LO (PWASTE) *WASTE+WASTE.UP*POPPOPWASTE (PWASTE) -
POPPOPWASTE.LO (PWASTE) *WASTE.UP;

RELAXEDLOW2 (PWASTE) ..
B (PWASTE) =L=POPPOPWASTE.UP (PWASTE) *WASTE+WASTE.LO*POPPOPWASTE (PWASTE) -
POPPOPWASTE.UP (PWASTE) *WASTE.LO;

OBJ2..          OBJECTIVE2=E=POPPOPWASTE ('COMP') *WASTE*24*360*6.50E-
3+WASTE*24*360*1E-8;

PARETO..        OBJECTIVE2=L=1000;

*

MODEL SIMPLIFIEDMPI
/OBJ1, OBJ2, PARETO, SEGFRESH, SEGSOURCEINT1, SEGSOURCEINT2, SEGSOURCEINT3, SEGSOURCEINT4, SEGSOURCE
INT5, SPLITPIN, MASSBALSINK, PROPBALSINK, MASBALWASTE, PROPBALWASTE, MAXSINKCONST, MINSINKCONST, MAX
ENVCONST, MINENVCONST, EQ12, EQ13, EQ14, EQ15, EQ16, EQ17, EQ18, EQ19P1, EQ19P2, EQ19P3, EQ20, EQ21,
EQ22, EQ23/;

*MODEL RELSIMPLIFIEDMPI
/OBJ1, OBJ2, , SEGFRESH, SEGSOURCEINT1, SEGSOURCEINT2, SEGSOURCEINT3, SEGSOURCEINT4, SEGSOURCEINT5, S
PLITPIN, MASSBALSINK, PROPBALSINK, MASBALWASTE, RELAXEDPROPBALWASTE, MAXSINKCONST, MINSINKCONST, MA
XENVCONST, MINENVCONST, RELAXEDUPP1, RELAXEDUPP2, RELAXEDLOW1, RELAXEDLOW2/;

SIMPLIFIEDMPI.SCALEOPT=1;

*RELSIMPLIFIEDMPI.SCALEOPT=1;

*

SIMPLIFIEDMPI.optfile=1;

*

*LIMITS

POPINSINK.LO (J, PSINKMIN) =PINSINKMIN (J, PSINKMIN);

POPINSINK.UP (J, PSINKMAX) =PINSINKMAX (J, PSINKMAX);

POPPOPWASTE.LO (PENVMIN) =CONSENVMIN (PENVMIN);

POPPOPWASTE.UP (PENVMAX) =CONSENVMAX (PENVMAX);

```

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

```

*
POPPROPWASTE.LO('COLOR')=1E-10;
POPPROPWASTE.L('COLOR')=0.00001;
WASTE.LO=1;
WASTE.UP=SUM(I,WSOURCE(I));
*
*****
*SIMPLIFIED SOLUTIONS***
*****
*
*CASE B -NO MASS INTEGRATION
*G.FX(I,J,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5)=0;
*
*SOLVE RELSIMPLIFIEDMPI USING LP MINIMIZING TAC
SOLVE SIMPLIFIEDMPI USING NLP MINIMIZING TOTALCOST;
*
*OPTIMAL COSTS -SEPARATED
PARAMETERS
CFRES    COST FOR FRESH SOURCES
CREC     COST FOR RECOVERY
CTOX     COST FOR TOXICITY
CAER     COST FOR AERATION
CNEU     COST FOR NEUTRALIZATION
CCOLOR   COSTO FOR COLOR
CPUMP    COST FOR PIPING AND PUMPING
CTOT     TOTAL COST;
CFRES=SUM(R,CF(R)*FFRESH.L(R))*HY;
CREC=SUM(I,SUM(INT1,C1(INT1)*W1.L(I,INT1)))*HY;
CTOX=SUM((I,INT1,INT2),C2(INT2)*W2.L(I,INT1,INT2))*HY;
CAER=SUM((I,INT1,INT2,INT3),C3(INT3)*W3.L(I,INT1,INT2,INT3))*HY;
CNEU=SUM((I,INT1,INT2,INT3,INT4),C4(INT4)*W4.L(I,INT1,INT2,INT3,INT4))*HY;
CCOLOR=SUM((I,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5),C5(INT5)*W5.L(I,INT1,INT2,INT3,INT4,INT5))*HY;
CPUMP=SUM(I,PIPECOSTSOURCEINT.L(I))+SUM(J,PIPECOSTINTSINK.L(J))+SUM(I,PIPECOSTINTWASTE.L(I))
+SUM(J,PIPECOSTFRESHSINK.L(J))*HY;
CTOT=CFRES+CREC+CTOX+CAER+CNEU+CPUMP+CCOLOR;
DISPLAY CFRES,CREC,CTOX,CAER,CNEU,CCOLOR,CPUMP,CTOT;
DISPLAY ALFA,POUTPIN;

```

## DISEÑO ÓPTIMO DE REDES DE AGUA EN PARQUES ECO-INDUSTRIALES CONSIDERANDO LA DISTRIBUCIÓN JUSTA DE LOS RECURSOS

---

```
PARAMETERS PINSINK(J,P),PROPWASTE(P);  
  
*  
PINSINK(J,'PH')=LOG10(POPINSINK.L(J,'PH'));  
PINSINK(J,'COLOR')=POPINSINK.L(J,'COLOR')**1/0.606;  
PINSINK(J,'DENSITY')=1/POPINSINK.L(J,'DENSITY');  
PINSINK(J,'VISCOSITY')=10**POPINSINK.L(J,'VISCOSITY');  
  
*  
PROPWASTE('PH')=LOG10(POPROPWASTE.L('PH'));  
PROPWASTE('COLOR')=POPROPWASTE.L('COLOR')**1/0.606;  
DISPLAY PINSINK,PROPWASTE;
```