



## RATIONAL USE OF WATER AND MINIMIZING THE PRODUCTION OF WASTE WATER INDUSTRY THROUGH PINCH ANALYSIS

## RACIONALIZACIÓN DEL USO DEL AGUA Y MINIMIZACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN LA INDUSTRIA A TRAVÉS DEL ANÁLISIS PINCH

**Maldonado, J. I.\* y Jean Armado\*\***

**\*M.Sc. Julio Isaac Maldonado M. Profesor Asociado**, Programa de Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Tel: 5685303 (ext. 140 ) e-mail: [jimaldonadom@unipamplona.edu.co](mailto:jimaldonadom@unipamplona.edu.co)

Ciudadela Universitaria. Pamplona, Norte de Santander, Colombia

Tel: 57-7-5685303, Fax: 57-7-5685303 Ext. 140 **\*\*M.Sc. Jean Armado, Profesor Pensionado**, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo – Venezuela., e-mail: [jeanarm@cantv.net](mailto:jeanarm@cantv.net)

**Abstract:** The scarcity of water anger grow in the future and consequently, the competition between the three major groups of water consumers , agriculture, industry and population will increase and address this situation , the industrial sector , which accounts for the weakness of aforementioned contest, is facing a new challenge, namely , make every effort to reduce water consumption. Many companies, based on an empirical approach, have adopted policies to reduce water consumption and therefore production of wastewater. However, it has developed a mathematical tool called Pinch Analysis, which when used in conjunction with mathematical minimization methods, to determine the minimum consumption of water required by any productive process. Furthermore, the design facilitates Pinch analysis of distributed wastewater treatment unlike centralized systems generally adopted systems. This paper aims to disseminate the possibility to use the Pinch Analysis to rationalize water use and minimize the production of wastewater in industry.

**Keywords:** Pinch analysis; Rational use of water, Minimum production of industrial wastewater.

**Resumen:** La escasez de agua tiende a crecer en el futuro; en consecuencia, la competencia entre los tres grandes grupos consumidores de agua, agricultura, sector industrial y población se incrementará día a día y frente a esta situación, el sector industrial es a quien le corresponde el punto débil de la contienda antes mencionada, porque tendrá que enfrentar a un nuevo reto, así que debe saber realizar el mayor esfuerzo posible para disminuir el

consumo de agua. Muchas empresas, basándose en un enfoque empírico, han adoptado políticas de reducción del consumo de agua y, por ende de producción de aguas residuales, sin embargo, se ha desarrollado una herramienta matemática denominada Análisis Pinch, que cuando se usa conjuntamente con métodos matemáticos de minimización, permite determinar el consumo mínimo de agua que se requiere cualquier proceso productivo. Además, el Análisis Pinch facilita el diseño de los sistemas distribuidos de tratamiento de agua residual en contraste con los sistemas centralizados, generalmente adoptados. Así que éste documento tiene por objetivo fundamental difundir la posibilidad de poder usar el Análisis Pinch para ración

**Palabras Claves:** Análisis Pinch. Minimización de consumo de agua y de generación de aguas residuales. Analizar el uso del agua y minimizar la producción de aguas residuales en la industria.

## 1. INTRODUCCIÓN

Al empezar el siglo 21, existe un riesgo creciente de escasez y contaminación del agua de hecho la disponibilidad de un agua limpia y en cantidad suficiente puede constituir la clave del desarrollo económico en los años por venir tal como el acceso al petróleo fue la clave del desarrollo en el siglo XX.

El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre y realiza un movimiento continuo entre la tierra y la atmósfera, que viene realizándose desde hace 3 mil millones de años a pesar del incremento de la contaminación del agua que se denomina ciclo del agua de los cuales se conocen los siguientes datos:

**Figura 1.-** Ciclo del agua



Fuente: [www.cespm.gob.mx/imagenes/jpg/cicloagua.jpg](http://www.cespm.gob.mx/imagenes/jpg/cicloagua.jpg)

Agua Salada: 96.5% océanos; Agua Dulce: 3,5%; que se distribuye así: 1.74 % glaciares y casquetes polares, 1.706% depósitos subterráneos, nieves y los glaciares continentales; 0.04% ríos, lagos, embalses, humedad del suelo, atmósfera y seres vivos

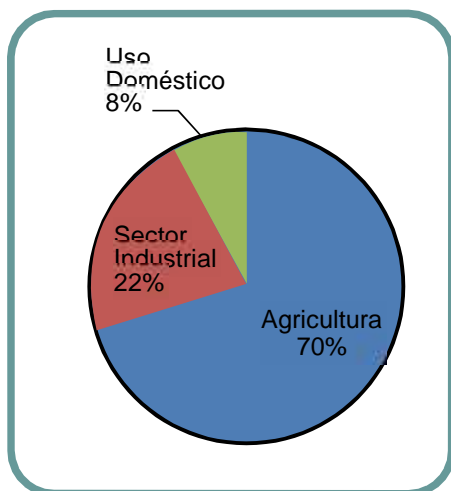
**Figura 2.-** Disponibilidad del agua dulce



Fuente: El autor

De la afluencia total de agua en el mundo a la fecha el 94% ya ha tenido contacto con la contaminación y se estima en 40 000 millones de km<sup>3</sup>/año el agua dulce renovable, con una disponibilidad promedio de 5700 m<sup>3</sup>/h –año (América latina y el caribe con 48.000, Norte América con 21.300, África con 9400 y la más crítica Europa con 4.400 m<sup>3</sup>/h-año) que se le da en promedio el siguiente uso:

Figura 3.- Uso del agua en el mundo



Fuente: El autor

La población del mundo viene creciendo de manera preocupante (7.046,400.000 hab.; 2012) teniendo países y ciudades super pobladas (China y Tokio) como se detalla en el siguiente cuadro y figura:

Tabla 1.- Superpoblación en el mundo.

Continente	Densidad (habitantes/km <sup>2</sup> )	Población (2011)	País más poblado	Ciudad más poblada
Asia	66.7	4.120.315.000	China (1.300.000.000)	Tokio (35.000.000)
África	62.7	994.027.000	Nigeria (162.217.041)	El Cairo (19.435.041)
Europa	71	731.573.000	India (112.210.000) España (45 millones en 2005)	Moscú (14.000.000)
América del Sur	25.9	351.731.000	Brasil (190.735.000)	Ciudad de São Paulo (21.140.000)
América del Norte	21.4	385.742.000	Estados Unidos (307.000.000)	Nueva York (19.677.000)
Oceania	4.20	38.502.000	Australia (22.000.000)	Sydney (4.000.000)
Antártida	0,0000 (0,000)	4.000 (100% permanente)	N/A	N/A

Fuente: es.wikipedia.org

Figura 4. Mapa de países por población

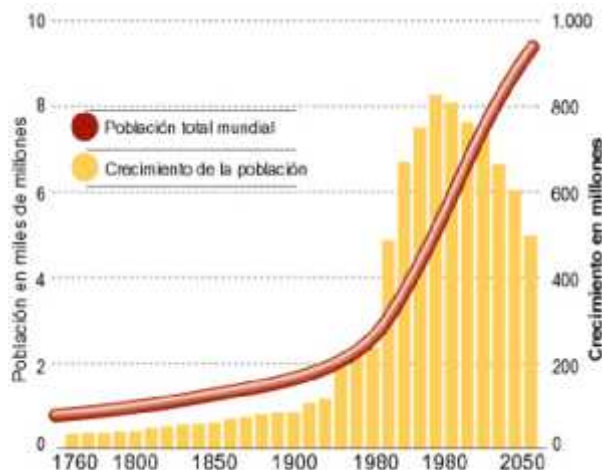


Fuente: es.wikipedia.org

La demanda de agua crece de manera

continua tanto debido al crecimiento de las poblaciones (se estima en 9.000 millones en el año 2050), como de la agricultura que debe proveer de alimento esa población y de la industria que debe proveer bienes y servicios, aumentando la competencia entre los tres sectores ya que el recurso es constante

Figura 5.- Evolución de la población mundial



Fuente: www.pakitin.files.wordpress.com

Por esta razón el Pacific Institute Organization en su publicación (2009) "Climate change And the Global Water Crisis: What Businesses Need to Know And Do", alertó al sector industrial del mundo sobre las consecuencias de la probable disminución de disponibilidad del agua, resaltando entre otros problemas:

- Menor disponibilidad de agua.
- Normas más exigentes respecto a su calidad
- Un activismo comunitario creciente y una atención también creciente de la parte pública respecto a las actividades corporativas relacionadas con el agua.
- Los riesgos relacionados con el agua constituyen hoy en día una amenaza que



➤ corresponde a varios billones de dólares para una gran variedad de negocios y inversionistas:

➤ Los inversionistas tanto corporativos como institucionales enfrenten sus propios desafíos específicos respecto al agua.

Hasta el momento pocas compañías e inversionistas han pensado estratégicamente sobre los riesgos y los impactos para las industrias provocados por la creciente escasez del agua, los cuales son los siguientes:

- La selección del sitio donde instalarse,
- La permisología para operar,
- La productividad,
- Los costos,
- Los beneficios y ganancias de las empresas
- La viabilidad de las nuevas empresas.

Efectos:

- Deterioro en la disponibilidad y seguridad del suministro del agua
- Deterioro de la calidad del agua
- Interrupciones en el suministro
- Imposibilidad de suplir los

requerimientos y las necesidades básicas

Esta escasez ya plantea unos desafíos serios a muchas compañías e industrias y afectará dramáticamente a muchas más, si las tendencias actuales del uso de agua continúan.

Para enfrentar estos riesgos se recomienda:

- Evaluar periódicamente el consumo actual de agua
- Evaluar las condiciones locales y los riesgos
- Jugar un papel protagonista en la toma de decisiones respecto a las políticas locales del agua para evitar posibles conflictos en periodo de crisis.

➤ Llevar registros históricos de:  
Consumos y calidad del agua usada  
Caudales y concentración de vertimientos

Impactos causados a la industria  
Cambios de eficiencias en los procesos en el tiempo.

➤ Establecer alianzas estratégicas regionales

➤ Comprometerse en mejoras continuas.

➤ Establecer una política del agua y fijar objetivos consecuentes.

➤ Utilizar la mejor tecnología disponible

➤ Tomar en cuenta el factor riesgo a la hora de tomar decisiones estratégicas

➤ Cifrar el consumo de agua y publicar reportes sobre el uso del agua y sus impactos manteniendo la historia de

los cambios de eficiencia en el tiempo.

➤ Utilizar las mejores técnicas y tecnologías disponibles para optimizar procesos que minimicen el consumo del agua como la "TECNOLOGIA PINCH"

**Base teórica:**

La Integración de Procesos (IP) es el conjunto de mejoras aportadas a un proceso, específicamente a las operaciones unitarias y las interacciones para que utilicen lo más eficientemente posible la energía, el agua y las materias primas, siendo una herramienta potente que juntas a otras técnicas tales como la simulación de procesos, que han permitido analizar sistemáticamente el conjunto de un proceso y las interacciones entre las diferentes partes que lo componen. La técnica de IP es aplicable a problemáticas industriales porque conduce ahorros de energía y reducción de gas con efectos invernaderos; descongestión de los puntos críticos de un proceso; optimización de



los procesos batch; optimización del consumo de hidrógeno; mejora en la concepción y utilización de los reactores, reducción del consumo de agua y de la producción de efluentes; optimización de las secuencias de separación; reducción de la producción de desechos; optimización del consumo agua y vertimientos; mejora en la concepción y utilización de los reactores; optimización del consumo de vapor y fluidos de enfriamiento, optimizaciones y reducciones que permite reducción los costos de inversión y de operación.

### **Ventajas de la IP.**

En general, la IP corresponde a un enfoque más eficiente respecto a los métodos de análisis convencionales particularmente en el caso de los complejos industriales grandes, ya que en estos casos solo un enfoque sistemático permite identificar las mejores posibilidades de mejoras, siendo el Análisis Pinch una de las técnicas más prácticas que se desarrolló en el dominio de la IP en estos 25 últimos años y en estos momentos esta técnica está en el diseño de algoritmos matemáticos para la optimización del diseño de redes.

El Análisis Pinch fue conceptualizado en

1978 por [Linnhoff](#) y [Vredeveld](#) que fue

aplicado inicialmente en sistemas termodinámicos (intercambio de calor), que terminaban en un diseño correcto de la red de intercambiadores de calor, de qué modo que se pueda aprovechar aquellas corrientes calientes y frías de una planta, para intercambiar calor entre ellas, minimizando así el uso de servicios de calentamiento o enfriamiento; posteriormente fue aplicada a procesos de transferencia de masa, recuperación de hidrógeno y diseño de

procesos de destilación y también se ha utilizado para optimizar el consumo de energía, agua o hidrógeno en numerosos procesos. Actualmente se está utilizando en proceso de minimización de consumos de agua, minimización de vertimientos líquidos y reuso; y en optimización de procesos de tratamiento de aguas residuales industriales, siendo una de principales metodologías de diseño de procesos industriales de finales de siglo pasado y comienzo de este, conocido en el mundo como **Water Pinch**, método conocido, aplicado y comprobado en los sectores industriales siguientes:

- Química;
- Petroquímica;
- Refinación de petróleo;
- Pulpa y papel;
- Agroalimenticia;
- Siderurgia.

### **Ventajas del Análisis Pinch:**

- Es una metodología sistemática para el diseño integrado de plantas de proceso
- Identifica el mínimo consumo de energía necesario
- Reducir al mínimo consumos de agua limpia y baja costos de materias primas
- Permite considerar varias opciones de diseño y rediseño en procesos industriales
- Considera al mismo tiempo el coste de energía y de capital
- Se puede aplicar en plantas de proceso, nuevas o ya existentes.
- Minimiza vertimientos líquidos y opta por el reuso bajando costos de tasas retributivas
- Mejora, optimiza y aumenta eficiencias en procesos de tratamiento de aguas residuales industriales bajando costos operativos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Técnicamente se ha establecido que el mejor momento para utilizar la Tecnología Pinch es cuando se planifica una inversión importante para modificar un proceso o antes que el diseño del proceso sea definitivamente decidido, esto permite determinar para un proceso o un conjunto industrial, cual es la cantidad mínima de energía, agua o hidrógeno necesario para su funcionamiento y en consecuencia, puede evaluarse el potencial máximo antes de entrar a la fase de diseño detallado del proyecto, cuyo enfoque estructurado para la gestión de los servicios permite los beneficios que se visualizan en la figura 6:

**Figura 6:** Beneficios y ventajas de un enfoque sistemático estructurado



**Fuente:** El autor

Adoptando un enfoque sistemático, no solamente se identifica una serie de proyectos sino que además estudia la combinación entre ellos para alcanzar los objetivos a largo plazo. Tal enfoque permite también reducir:

- Los costos operativos;
- Las inversiones al mismo tiempo que se planifican;
- La duración y amplitud de los trabajos de ingeniería necesarios.

A partir de un balance de materia y de

energía, representativo de las condiciones de explotación del proceso, se construye un modelo que representa las principales corrientes de energía y/o materia y que permite:

- Definir las metas de consumo mínimo y el potencial máximo de ahorros;
- Identificar las razones de las ineficiencias en el proceso y los proyectos de mejora que se pueden realizar en la práctica;
- Determinar las zonas que presentan el mayor potencial de mejora y hacia las cuales resulta preferible orientar los esfuerzos.

Al establecer las metas de consumo mínimo, el Análisis Pinch permite obtener una visión global del proceso garantizándose que los proyectos resultantes sean compatibles entre ellos. Esta visión global del conjunto del complejo permite a menudo identificar posibilidades nuevas e importantes en punto donde nadie se lo esperaba.

### Enfoque combinando de análisis y diseños de procesos

Los problemas complejos relacionados con la gestión óptima de la energía, del agua y del hidrógeno se dividen generalmente en una fase de análisis y otra de diseño

**Figura 7.-** Esquema procedimental: Análisis Pinch



**Fuente:** El autor

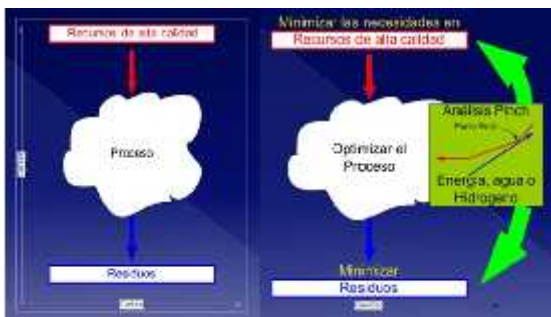
El análisis Pinch permite enfocar el problema de la gestión óptima de los servicios en su integralidad.

. En efecto, una vez el análisis terminado, se está seguro de haber identificado las causas de todas las fuentes de ineficiencia, de conocer las que se pueden corregir de una manera económicamente rentable y de saber cuáles modificaciones del proceso resultarían benéficas.

. El análisis Pinch es un enfoque riguroso y estructurado que permite identificar varios proyectos de mejoras de los procesos y servicios.

. La simplicidad de los principios que la fundamentan y los resultados obtenidos en el mundo entero, explican su éxito.

**Figura 8.** Esquema del proceso Análisis Pinch



**Fuente:** El autor

El principio fundamental del análisis Pinch consiste en satisfacer las necesidades de cada equipo o proceso con una fuente apropiada, producida por otro punto del proceso o por los servicios.

. La capacidad de hacer coincidir la oferta y la demanda depende del nivel de calidad exigido por el equipo y del nivel de calidad disponible en la empresa.

. Haciendo corresponder lo mejor que se puede ofertar y demanda, disminuye las necesidades de fuentes externas de estos

recursos es decir que se favorece la utilización sostenible de los recursos.

### Metodología

. Se representa el proceso en función de necesidades y de emisiones (pozos y fuentes) para el recurso considerado (energía, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub>, etc.)

. La solución óptima se obtiene al realizar la mejor adecuación posible entre fuentes y pozos compatibles.

. El parámetro que permite saber si una fuente y un pozo son compatibles es la calidad, grado de pureza en el caso del agua.

. Toda transferencia ineficiente entre dos puntos del proceso impide obtener la solución óptima. La suma de todas las transferencias ineficientes es igual al excedente del recurso que debe conseguirse con una fuente externa

El Análisis Pinch aplicado a las redes de agua es llamada tecnología **WATER PINCH** que es una técnica sistemática de análisis de las redes de agua de un sitio industrial que puede aplicarse a la mayoría de los procesos que utilizan agua limpia y producen aguas residuales y es particularmente bien adaptado a las redes de agua muy complejas.

**Figura 9.** Redes complejas industriales



**Fuente:** www.boccard.com

En la actualidad, la motivación más importante para realizar un Análisis Pinch de la red de agua de una empresa es la reducción de la cantidad de efluentes emitidos para reducir las inversiones necesarias cuando se aumenta la capacidad del sistema de tratamiento.

De manera precisa el **WATER PINCH** permite optimizar el consumo del agua, busca una integración de su uso entre las distintas operaciones que componen un proceso productivo, permite calcular el reuso de las aguas industriales, la minimización de efluentes, y el diseño de un sistema de tratamiento de efluentes distribuido.

La tecnología **Water Pinch** fue desarrollada por Mann, James G. y Liu, Yih An (1999)<sup>2</sup> para la siguiente temática:

- Reutilización de agua industrial y Minimización de aguas residuales
- Minimización de las aguas residuales a través de la reutilización del agua con un solo contaminante
- Minimización de las aguas residuales a través de la reutilización
- Diseño de redes que utilizan agua
- El Diseño de Sistemas Distribuidos de tratamiento de efluentes
- Minimización de las aguas residuales a través de la regeneración del agua, reutilización y reciclaje
- Minimización de aguas residuales a través de cambios en el proceso
- Minimización de aguas residuales en sistemas de múltiples contaminantes;
- Minimización de aguas residuales en sistemas de múltiples contaminantes: Análisis de agua-Pinch y Síntesis.
- Minimización de aguas residuales mediante optimización matemática

La aplicación directa del **WATER PINCH** es:  
 . Integración del uso de materiales primas

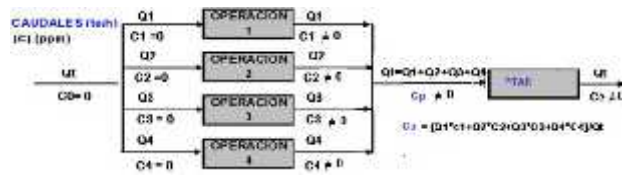
(agua) y energías

- . Minimización de la generación de residuos
- . La reutilización de aguas industriales
- . Minimización del agua de uso industrial
- . Reutilización del agua industrial
- . Optimización de sistemas de tratamiento
- . Minimización de aguas residuales con reducción de efluente.

### 3. DISEÑO DE UN PROCESO DE MINIMIZACIÓN DE USO DEL AGUA.

La Jimmca Ltda demandaba un consumo de  $Q_t = 130 \text{ m}^3/\text{hora}$  de agua limpia [ $C = 0 \text{ ppm}$ ] en 4 procesos operativos industriales que requerían un caudal operativo  $Q_i$  cada uno.

Figura 10.- Diagrama de bloque (Jimmca Ltda)



Fuente: El Autor

En el proceso tenían las restricciones operacionales indicadas en la tabla No X y se generaba un solo contaminante que debía ser tratado de acuerdo a la legislación ambiental

Tabla 2.- Restricciones operacionales

OPERACION (i)	$\Delta m_i$ (Kg/h)	$C_i^{in}$ (ppm)	$C_i^{out}$ (ppm)
1	1,20	0	60
2	1,35	0	45
3	2,40	30	90
4	1,50	75	105

Fuente: El Autor

La industria requería diseñar la red interna de agua para el caudal mínimo de agua. .

#### 3.1 Cálculo del caudal mínimo

Condición: Cuando no hay utilización de agua  
 Cálculo de caudales límites de c/ operación:



$$f_{lim}^i (Te/h) = 10^3 * m_i (Kg/h) / C_{lim}^{i, out} (ppm) - C_{lim}^{i, in} (ppm)$$

$$f_{lim}^1 (Te/h) = 10^3 * 1,200 (Kg/h) / 6 - 0 \text{ ppm} = 20$$

$$f_{lim}^2 (Te/h) = 10^3 * 1,350 (Kg/h) / 45 - 0 \text{ ppm} = 30$$

$$f_{lim}^3 (Te/h) = 10^3 * 2,400 (Kg/h) / 90 - 30 \text{ ppm} = 40$$

$$f_{lim}^4 (Te/h) = 10^3 * 1,500 (Kg/h) / 105 - 75 \text{ ppm} = 50$$

**Tabla 3.- Caudales mínimo de c/operación**

OPERACION (i)	$\Delta m_i$ (Kg/h)	$C_{lim}^{i, in}$ (ppm)	$C_{lim}^{i, out}$ (ppm)	$f_{lim}^i$ (Te/h)
1	1,200	0	60	20
2	1,350	0	45	30
3	2,400	30	90	40
4	1,500	75	105	60

Fuente: El Autor

130

### 3.2. Cálculo del caudal mínimo límite

Este cálculo de agua limpia es en cada operación sin reutilización de efluentes;  
 $f_i (Te/h) = 10^3 * m_i (Kg/h) / C_{lim}^{i, out} (ppm)$

$$f_1 (Te/h) = 10^3 * 1,200 (Kg/h) / 60 \text{ ppm} = 20$$

$$f_2 (Te/h) = 10^3 * 1,350 (Kg/h) / 45 \text{ ppm} = 30$$

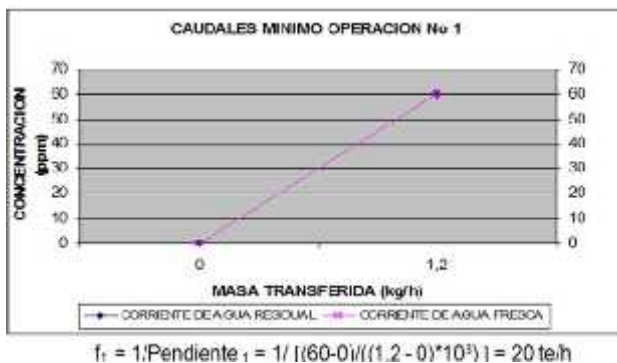
$$f_3 (Te/h) = 10^3 * 2,400 (Kg/h) / 90 \text{ ppm} = 26,67$$

$$f_4 (Te/h) = 10^3 * 1,500 (Kg/h) / 105 \text{ ppm} = 14,28$$

90,95

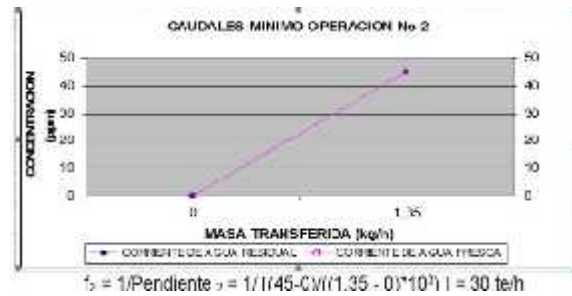
Cálculo gráfico:

**Figura 11.- Caudal mínimo operación No 1**



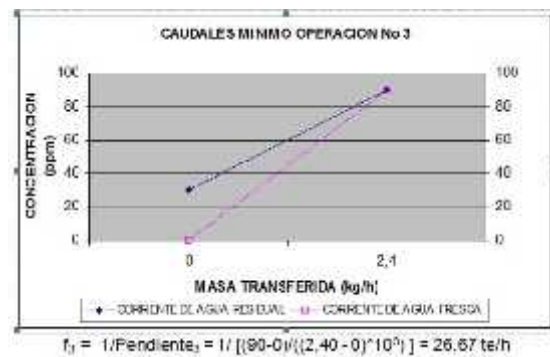
Fuente: El Autor

**Figura 12.- Caudal mínimo operación No 2**



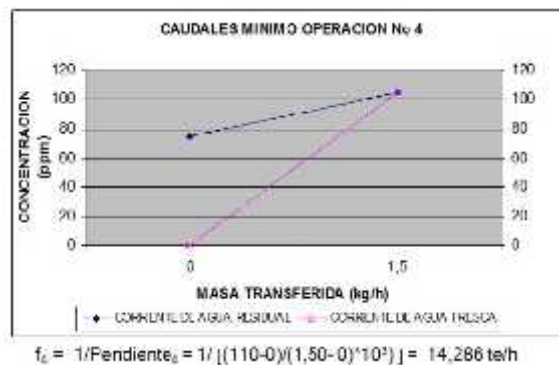
Fuente: El Autor

**Figura 13.- Caudal mínimo operación No 3**



Fuente: El Autor.

**Figura 14.- Caudal mínimo operación No 4**



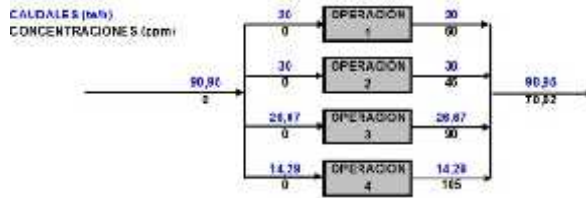
Fuente: El Autor

**Tabla 4. Qmínimos y [Cpromedio]salida**

OPERACION (i)	$\Delta m_i$ (Kg/h)	$C_{lim}^{i, out}$ (ppm)	$f_i$ (Te/h) Agua fresca
1	1,200	60	20,000
2	1,350	45	30,000
3	2,400	90	26,667
4	1,500	105	14,286
	$C_{lim}^{i, out}$ [promedio]	79,916	90,952

Fuente: El Autor

Figura 15.- Diagrama de bloque Qmínimos



Fuente: El Autor

### 3.3. Cálculo caudal mínimo límite Método-CID

Cálculo de la masa de transferencia Método-CID, donde:

$$m_i \text{ (Kg/h)} = (C^{lim, out}) \text{ (ppm)} * \text{Sumatoria}(f^{lim} \text{ (Te/h)}) \text{ con rango similar}/10^3$$

$$m_1 = (30-0) * (20+30)/10^3 = 1,5$$

$$m_2 = (45-30) * (20+30+40)/10^3 = 1,35$$

$$m_3 = (60-45) * (20+40)/10^3 = 0,90$$

$$m_4 = (75-60) * (40)/10^3 = 0,60$$

$$m_5 = (90-75) * (90)/10^3 = 1,35$$

$$m_6 = (105-90) * (50)/10^3 = 0,75$$

Determinación Qmínimo límite de agua limpia  
 $f \text{ (te/h)} = m \text{ (Kg/h)} * 10^3 / (C^{lim, mayor}) \text{ ppm}$

$$f_0 \text{ (te/h)} = 0,0 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 0,0 \text{ (ppm)} = 0,000$$

$$f_1 \text{ (te/h)} = 1,5 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 30 \text{ (ppm)} = 50,00$$

$$f_2 \text{ (te/h)} = 2,85 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 45 \text{ (ppm)} = \mathbf{63,34 (Qmín)}$$

$$f_3 \text{ (te/h)} = 3,75 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 60 \text{ (ppm)} = 62,50$$

$$f_4 \text{ (te/h)} = 4,35 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 75 \text{ (ppm)} = 58,00$$

$$f_5 \text{ (te/h)} = 5,7 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 90 \text{ (ppm)} = \mathbf{63,34 (Qmín)}$$

$$f_6 \text{ (te/h)} = 6,450 \text{ (Kg/h)} * 10^3 / 105 \text{ (ppm)} = 61,43$$

Tabla 5. Cálculo Qmínimo límite Método-CID

OPERACION	INLET (Q)	OUTLET (Q)	CONCENTRACION (C)	TRANSFERENCIA (m)	f (te/h)
1	90,90	30	0	1,5	50,00
2	20	45	30	1,35	63,34
3	20	60	45	0,90	62,50
4	40	75	60	0,60	58,00
5	90	90	75	1,35	63,34
6	50	105	90	0,75	61,43

Fuente: El Autor

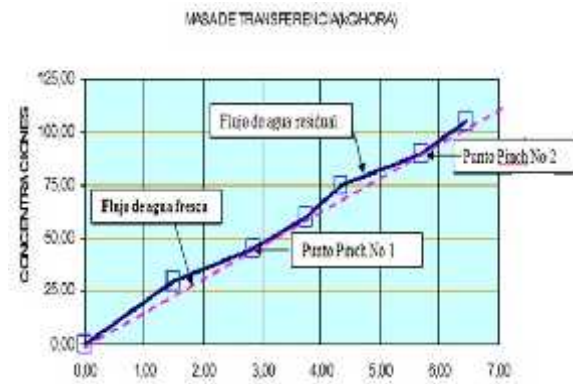
### 3.4. Cálculo caudal mínimo límite Método -CC

Tabla 6.- Valores de  $m_i$  (Kg/h) VS  $C^{lim, out}$  (ppm)

Ami DE TRANSFERENCIA (Kg/h)	$C^{lim, out}$ (ppm)
0	0
1,5	30
2,85	45
3,75	60
4,35	75
5,7	90
6,45	105

Fuente: El Autor

Con estos valores se grafica la figura X.



Fuente: El Autor

De la gráfica se obtiene que la tangente corta

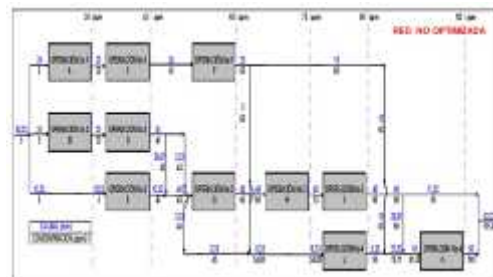
la curva en dos puntos o Puntos Pinch (2,85; 45) y (5,7; 90) de donde se puede calcular la pendiente de la línea tangente:

$$m = (45-0) m^3/h / (2,85-0,0) = 15,78947$$

$$f_{mínimo} \text{ (te/h)} = 1/m * 10^3 = (1/15,78947) * 10^3 = 63,34 \text{ te/h (Qmín. de agua limpia)}$$

Existen alternativas de redes de minimización de agua en los procesos de operación industrial (Verfig.17)

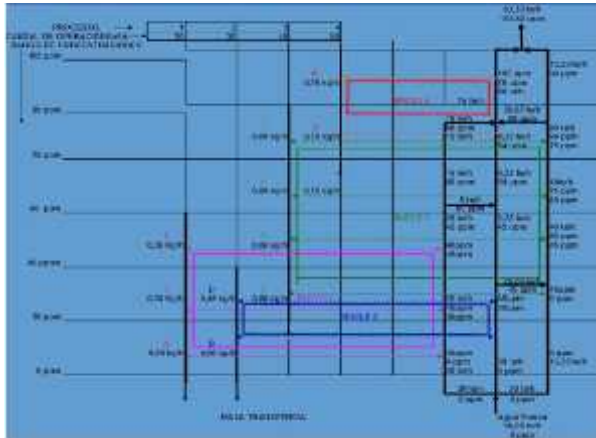
Figura 17. Red alterna (No optimizada)



Fuente: El Autor

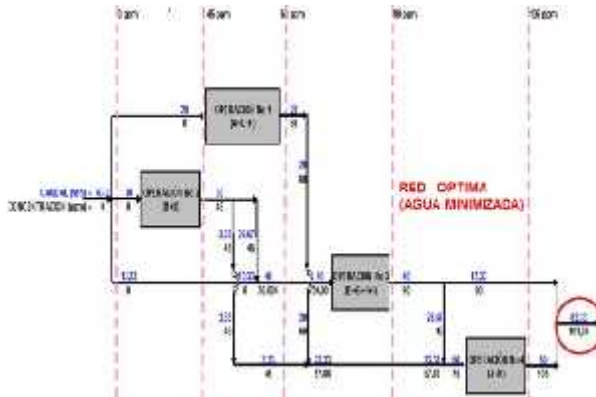
Mediante la tecnología Pinch y de manera gráfica y mediante la integración de cuatro bucles (Ver Fig. X) se obtiene la red optimizada (Ver Fig X):

**Figura 18.** Optimización red agua minimizada



**Fuente:** El Autor

**Figura 19.** Red agua minimizada optimizada.



**Fuente:** El Autor

Procesos similares de optimización de tratamientos de aguas residuales también se lograron mediante la tecnología Water – Pinch. Otro proceso de optimización logrado en la industria, donde se pretendían remover concentraciones altas de dos contaminantes (hasta cumplir la legislación ambiental) de tres corrientes de aguas residuales

mediantes tres tipos de tratamientos con eficiencias y costos de tratamiento diferentes (tablas 7,8 y 9)

**Tabla 7:** Restricciones operacionales

Corriente (i)	$f_i$ (t/h)	$C_{A,i}$ (ppm)	$C_{B,i}$ (ppm)
1	10	750	100
2	20	500	150
3	30	250	100

**Fuente:** El Autor

**Tabla 8:** Proceso de tratamientos y eficiencias

Proceso (i)	$\epsilon_A$	$\epsilon_B$	Costo Relativo
I	0.99	0.99	Alto
II	0.70	0	Bajo
III	0	0.95	Bajo

**Fuente:** El Autor

**Tabla 9:** Normas Ambientales

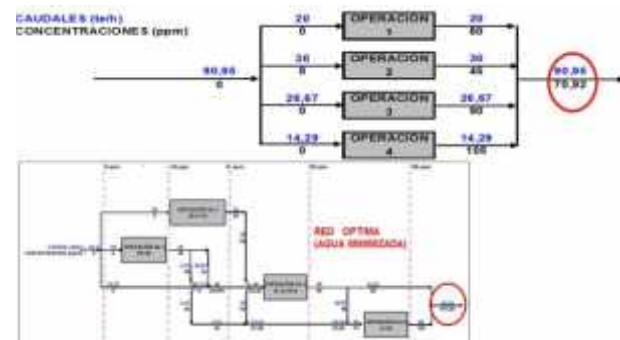
Proceso (i)	$C_{out}$ (ppm)
Contaminante A	10
Contaminante B	5

**Fuente:** El Autor

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 20 se presenta los esquemas de las redes antes y después del proceso de optimización que termino con la minimización en el uso de agua, donde se concluye que la tecnología Water Pinch logra una reducción de 30.36% (27,62 l/s) demostrando la efectividad de esta tecnología.

**Figura 20.** Esquema antes y después de la minimización.



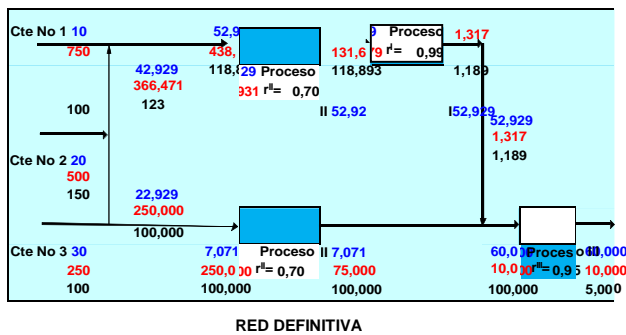
**Fuente:** El Autor

**Figura 21.** Esquemas de optimización del tratamiento contaminantes A y B (independientes).



Fuente: El Autor

**Figura 22.** Esquema integrado de optimización del sistema de tratamiento para contaminantes A y B



Fuente: El Autor

## 5. CONCLUSIONES

- La tecnología Pinch aplicada al agua (Water Pinch) debe considerarse como un método más de diseño de un nuevo proceso, que trata de asociar las fuentes (emisiones de agua de un equipo o proceso) con las demandas (necesidades de agua de un equipo o proceso), aplicando las reglas de base del Análisis Pinch se generaran ideas muy interesantes para optimizar el diseño de un proceso.

\* El potencial de reducción del consumo de agua depende ampliamente de los objetivos del proyecto.

\* Las soluciones identificadas a través del Análisis Pinch tienen a menudo impactos que van más allá del simple ahorro de agua; en efecto estas soluciones provocaran también un ahorro en las inversiones de capital, la recuperación de materias primas y a veces la recuperación de la energía térmica.

\* La Tecnología Pinch permite identificar los proyectos que conduzcan a una mejor utilización del agua en los procesos.

\* El hecho de utilizar técnicas más eficientes y algoritmos potentes que identifican y optimizan las mejores posibilidades de reutilización o de regeneración del agua (tratamiento parcial de las aguas de proceso que permite su reutilización) y permiten también mejorar el tratamiento de los efluentes.

\* Permite identificar los proyectos que conducen a una mejor utilización del agua en los procesos.

\* Estos últimos 25 años, el análisis Pinch se aplicó con éxito obteniendo ahorros obtenidos son los siguientes porcentajes típicos:

- Reducción consumo de energía: 10 - 35%
- Más recientemente, se obtuvieron resultados espectaculares en la optimización

del consumo de agua e hidrógeno  
Consumo de agua; reducción: 25 - 40%  
Consumo de H<sub>2</sub>: Reducción de hasta un 20% en refinación de petróleo.

- Reducción de vertimientos: 10-50%

Hoy las técnicas más eficientes utilizan algoritmos potentes que identifican y optimizan las mejores posibilidades de reutilización o de regeneración del agua (tratamiento parcial de las aguas de proceso que permite la reutilización), además permiten mejorar el tratamiento de los efluentes.

En conclusión la tecnología Pinch aplicada al agua (**WATER PINCH**) debería considerarse como un método más pero importante cuando se diseña un nuevo proceso ya que tratando de asociar las fuentes (emisiones de agua de un equipo o proceso) con las demandas (necesidades en agua de un equipo o proceso) aplicando las reglas de base del análisis Pinch, generando ideas muy interesantes para optimizar el diseño de un proceso.



### **Referencias Bibliográficas**

- Kemp, I.C. (2006). Pinch Analysis and Process Integration: A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy, 2nd edition).
- Mann, James G. and Y. A. Liu, Industrial Water Reuse and Wastewater Minimization, McGraw-Hill, New York (1999).
- Pacific Institute Organization: Climate change And the Global Water Crisis: What Businesses Need to Know And Do” United Nations Global Compact (Mayo, 2009).