

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA**  
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO  
*DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y NUCLEAR*



**EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE  
RECUPERACIÓN DE VERTIDOS CONTAMINADOS  
POR IONES DE METALES PESADOS MEDIANTE  
TÉCNICAS EVAPORATIVAS. ANÁLISIS  
ENERGÉTICO Y ECONÓMICO.**

TESIS DOCTORAL

Autor:  
Nicolás Laguarda Miró

Directores:  
Dra. Esperanza García Castelló  
Dr. Julián Lebrato Martínez

Valencia, Febrero de 2005



EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO DE RECUPERACIÓN DE  
VERTIDOS CONTAMINADOS POR IONES DE METALES  
PESADOS MEDIANTE TÉCNICAS EVAPORATIVAS.  
ANÁLISIS ENERGÉTICO Y ECONÓMICO.

Tesis doctoral presentada por:

Nicolás Laguarda Miró

Bajo la dirección de:

Dra. Esperanza García Castelló y Dr. Julián Lebrato Martínez

Para optar al grado de Doctor en el programa:  
Tecnología de membranas, Electroquímica y Medio Ambiente, Seguridad Nuclear  
Universidad Politécnica de Valencia  
Departamento de Ingeniería Química y Nuclear



*“El agua es el más excelente de nuestros bienes.”*  
Píndaro.

*“Todos tienen el derecho a disfrutar de un medio ambiente adecuado  
(...) así como el deber de conservarlo.”*  
Art. 45. C. E.

*“...que tot està per fer i tot és possible.”*  
Miquel Martí i Pol.



Este trabajo ha sido realizado en el ámbito de las líneas de investigación del grupo I+D+I TECAR siendo financiado por convenios de investigación relacionados con la línea en la que está suscrito. Los trabajos de experimentación se han realizado en los laboratorios de investigación del citado grupo.

Este trabajo ha contado también con el apoyo y colaboración del grupo I+D+I TAR de la Universidad de Sevilla.



## Agradecimientos

---

A mis directores de Tesis, la Prof. D<sup>a</sup> Esperanza García Castelló, responsable de la línea de investigación en la que se ha acogido este trabajo de investigación, y el Prof. D. Julián Lebrato Martínez, profesor de reconocido prestigio, por sus consejos y reflexiones aportados a la realización de este trabajo desde sus comienzos hasta su redacción final.

Al Profesor D. José García Garrido, promotor de esta Universidad Politécnica de la enseñanza de la Ingeniería del Agua y responsable científico del grupo TECAR, por su interés y disponibilidad y por la calidad de sus consejos para la realización de este trabajo.

Al director de la ETSID, Prof. D. Enrique Ballester Sarriás, por haber facilitado los medios estratégicos necesarios y por su apoyo personal incondicional, que ha hecho más fácil el camino.

Al Prof. D. Gumersindo Verdú Martín, bajo la dirección del cual se inició la elaboración de esta Tesis y asimismo al Prof. D. Jaime Lora García, actual director del Departamento, que ha favorecido con su apoyo académico y administrativo las distintas etapas que han permitido concluir mi trabajo.

A los miembros del grupo TECAR por su incansable apoyo personal tanto en la fase experimental como en la redacción del presente documento.

A Felipe García Castelló por la labor técnica en la redacción del texto.

Al personal de la sección de administración y servicios del Departamento: Lucía, Teresa y M<sup>a</sup> Ángeles, por su ayuda en la facilitación de los trámites administrativos.

A D. Juan Pedro Delaval, director de DELABO, por el soporte técnico, sugerencias y también por el tesón con que realiza su trabajo, que se contagia...

A los Ingenieros Técnicos, María Pascual Barber, Beatriz Bernabeu Juárez, Carmen Hernández Crespo, M<sup>a</sup> Cristina García Pérez, Carles Escrivà Llorca, David C. Soriano Pedrón, Patricia Cebrián Vicente y José Perlés Giner, por su aportación a la fase inicial de los trabajos.

A Diana Holgado, por animarme siempre, y Arcadio Sánchez, por saber ver las cosas desde un punto de vista diferente. A Nacho Lucas, Maite Pérez, Rebeca Aparicio, Berta Gómez, Carlos Hinarejos y Paco Nácher, por estar cuando se les necesita.

A mi familia por su constante soporte (y su infinita paciencia).

A todos ellos, mi reconocimiento.  
Gracias.



## Resumen

---

Uno de los problemas que con más frecuencia se presenta en el medio ambiente actual es el de la contaminación de las aguas continentales con iones de metales pesados. Dentro de éstos, destacan especialmente los desastres naturales derivados de actuaciones humanas poco responsables, como los ocurridos en la cuenca del Guadiamar y en el Parque Nacional de Doñana (Sevilla) provocado por los vertidos de la empresa Boliden, o la contaminación minera en Río Tinto (Huelva) por poner tan sólo algunos ejemplos de este tipo de incidentes en la península ibérica.

Debe considerarse también la necesidad histórica de valorización de los residuos procedentes de usos industriales que tradicionalmente han sido desechados sin consideración alguna respecto a su reutilización. Entre estos vertidos se encuentran tanto aguas contaminadas con iones metálicos como flujos de calor residual originados en algún proceso industrial. Estos últimos tienen la capacidad de ser utilizados como fuente de calor así como los primeros, que tradicionalmente han causado problemas de vertido, pueden ser reconsiderados como materia primera en algún otro proceso industrial, lo que libera al medio natural de uno de sus principales contaminantes y a las empresas del coste de su eliminación o tratamiento.

Una opción potencialmente viable de valorización de estos caudales, especialmente si éstos proceden de calderines o cualquier proceso térmico industrial es el de su uso como fuente de calor para procedimientos térmicos de descontaminación de aguas. Este aprovechamiento no sólo supone una nueva dimensión en las posibilidades de ahorro económico en las industrias sino también una mejora sustancial en los problemas medioambientales derivados del vertido de aguas contaminadas con iones metálicos al medio natural.

Con esto, se plantea una línea de investigación, que pretende lograr mediante procedimientos asumibles técnicamente, la descontaminación de este tipo de aguas con un coste razonable, así como con las máximas ventajas posibles para el entorno natural mediante la utilización de tecnologías evaporativas.



## Resum

---

Un dels problemes que es presenten al medi ambient actual més freqüentment és el de la contaminació d'aigües continentals amb ions de metalls pesats. Dins d'aquests, destaquen especialment els desastres naturals derivats d'actuacions humanes poc responsables, com ara els ocorreguts a la conca del Guadiamar i al Parc Nacional de Doñana (Sevilla) provocats pels abocaments de l'empresa Boliden, o bé la contaminació minera a Rio Tinto (Huelva), per posar només alguns exemples d'aquest tipus d'incidents a la península ibèrica.

Cal considerar també la necessitat històrica de la valoració dels residus procedents d'usos industrials que tradicionalment han estat rebutjats sense cap consideració a la seua reutilització. Sovint es troben, entre aquests abocaments, aigües contaminades amb ions metàl·lics i fluxos de calor residual originats en processos industrials. Aquests últims tenen la capacitat de ser utilitzats com a font de calor. Tanmateix els primers, que tradicionalment han causat problemes d'abocaments, poden ser reconsiderats com a matèria primera en algun altre procés industrial, la qual cosa allibera al medi natural d'un dels seus principals contaminants i a les empreses del cost de la seua eliminació o tractament.

Una opció potencialment viable de valoració d'aquests cabals, especialment si procedixen de calderets o qualsevol procés tèrmic industrial és el del seu ús com a font de calor per a procediments tèrmics de descontaminació d'aigües. Aquest aprofitament no només suposa una nova dimensió en les possibilitats d'estalvi econòmic de les indústries sinó també una reducció substancial dels problemes mediambientals derivats de l'abocament d'aigües contaminades amb ions metàl·lics al medi natural.

Amb tot això, es planteja una línia d'investigació que pretén aconseguir, per mitjà de procediments assumibles tècnicament, la descontaminació d'aquest tipus d'aigües amb un cost raonable i amb els màxims avantatges possibles per a l'entorn natural per mitjà de la utilització de tecnologies evaporatives.



## Résumé

---

Un des problèmes les plus fréquents qui se présentent dans l'environnement actuel est celui de la pollution des eaux continentales avec ions de métaux lourds. Parmi ces pollutions, il faut remarquer spécialement les désastres naturels dérivés de conduites humaines peu responsables, comme ceux qui ont eu lieu dans le bassin du Guadiamar et le Parc National de Doñana (Séville), produits par les rejets de l'entreprise Boliden, où la pollution minière à Rio Tinto (Huelva), pour ne signaler que deux exemples de ce type d'incidents à la Péninsule Ibérique.

Il faut aussi considérer le besoin historique de valorisation des résidus provenant des usages industriels qui traditionnellement ont été rejetés sans aucune considération sur sa réutilisation. Parmi ces rejets on trouve d'eaux polluées avec ions métalliques et aussi de flux de chaleur résiduaire causés par un processus industriel. Ces derniers flux sont capables d'être utilisés comme source de chaleur. Les premiers, qui traditionnellement ont provoqué des problèmes de rejet, peuvent être reconsidérés comme matière première d'une autre procédure industrielle, ce qui libère au milieu naturel d'un de ses principaux polluants et aux entreprises, du coût de traitement et de rejet.

Une option potentiellement viable de valorisation de ces débits, spécialement si ceux-ci procèdent de petites chaudières ou d'un autre procédure thermique industriel, est son utilisation comme source de chaleur dans des processus thermiques de dépollution d'eaux. Cette mise en valeur n'implique pas seulement une nouvelle dimension des possibilités d'épargne économique dans les usines, mais aussi une amélioration substantielle des problèmes environnementaux dérivés du rejet d'eaux polluées avec ions métalliques au milieu naturel.

Avec cela, on propose une ligne de recherche qui prétend réussir moyennant méthodes techniquement acceptables la dépollution de ce genre d'eaux avec un coût raisonnable et avec les plus grandes avantages possibles pour le milieu naturel grâce à l'utilisation de techniques évaporatoires.



## Summary

---

Continental water pollution by heavy metal ions is one of the most common problems actually found in the environment. Some examples can be shown to stand out natural disasters derived from human slightly responsible actions, such as those happened in the basin of Guadiamar River and Doñana's National Park (Seville) provoked by poured wastes from Boliden Company, or also mining pollution in Rio Tinto (Huelva).

The historical need of industrial wastes valorization must also be considered. Industrial wastes have traditionally been rejected without considering their reutilization. Water polluted by heavy metal ions can be found among those wastes and even residual heat flows from any industrial process can be found too. Residual heat flows can be used as a heat source as well as water polluted by heavy metal ions, that has traditionally generated problems because of its rejection, can be used as raw materials in some industrial processes. Thus, the environment is freed from one of its main pollutants and the companies save the treatment costs.

The use of residual heat flows as a heat source to water decontamination can be considered as a potentially feasible option for their valorization, specially if they come from boilers or any other industrial thermal process. The utilization of residual heat flows is not only a new dimension in industrial economic save possibilities but also an important improvement in the environmental problems solutions derived from the rejection of metal ions polluted water into the environment.

Finally, an investigation line appears, that tries to achieve the decontamination of this kind of water with reasonable costs by means of technically feasible procedures, using evaporative technologies to get the best advantages for the natural environment.



# ÍNDICE

---

## I.- ANTECEDENTES 1

---

1. Introducción
2. Antecedentes

## II.- PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL DE LOS METALES 7

---

3. Generalidades
4. Fenómenos de transporte de los metales
5. El impacto de los metales en los seres vivos

## III.- SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE METALES PESADOS DE EFLUENTES RESIDUALES 29

---

6. Generalidades
7. Procesos térmicos
8. Procesos no térmicos

## IV.- PROCESOS TÉRMICOS DE SEPARACIÓN, RECUPERACIÓN Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES 55

---

9. Generalidades
10. Evaporación súbita multietapa
11. Evaporación por efectos múltiples
12. Evaporación por compresión de vapor

V.- OBJETO 65

---

- 13. Objeto
- 14. Justificación de la investigación
- 15. Objetivos

VI.- METODOLOGÍA 75

---

- 16. Justificación de la elección de un Modelo de Evaporación de Película Ascendente (MEPA)
- 17. Desarrollo de la investigación
- 18. Descripción de las instalaciones
- 19. Protocolo de ensayos
- 20. Diseño experimental
- 21. Métodos analíticos

VII.- RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN 111

---

- 22. Resultados para objetivo nº1
- 23. Resultados para objetivo nº2
- 24. Resultados para objetivo nº3
- 25. Resultados para objetivo nº4
- 26. Análisis crítico de los resultados de los ensayos: Comparativas y discusión

VIII.- ESTUDIO ENERGÉTICO 157

---

- 27. Descripción de los métodos de cálculo energético para intercambiadores de calor
- 28. Estudio energético del MEPA #1
- 29. Estudio energético del MEPA #2
- 30. Síntesis de los resultados energéticos obtenidos

**IX.- ESTUDIO ECONÓMICO** **187**

---

- 31. Consideraciones previas
- 32. Economía del MEPA #1
- 33. Economía del MEPA #2
- 34. Comparación de la economía de los procedimientos utilizados

**X.- CONCLUSIONES** **213**

---

- 35. Conclusiones particulares de los ensayos y resultados experimentales
- 36. Conclusiones particulares del estudio energético
- 37. Conclusiones particulares del estudio económico
- 38. Conclusión general

**BIBLIOGRAFÍA** **225**

---

**ANEXOS** **237**

---

- I. Legislación relativa a los vertidos de metales al medio
- II. Anexo Fotográfico
- III. Aplicaciones industriales de la tecnología empleada
- IV. La contaminación por metales: El caso de Aznalcóllar



## Índice de Tablas

---

<b>Tabla 7.1.-</b> Presión de vapor para el agua pura expresada en mm Hg	38
<b>Tabla 18.1.-</b> Características del generador de vapor utilizado en los primeros ensayos	85
<b>Tabla 18.2.-</b> Características de la bomba sumergida para los ensayos con recipiente y resistencia	87
<b>Tabla 18.3.-</b> Características de la bomba de vacío TELSTAR RD-18	87
<b>Tabla 18.4.-</b> Características de la bomba de vacío TELSTAR S-4	88
<b>Tabla 18.5.-</b> Características de la bomba de vacío KNF NEUBERGER N 035.3	88
<b>Tabla 18.6.-</b> Características del intercambiador de tubo recto vertical	90
<b>Tabla 18.7.-</b> Características del intercambiador de doble columna en espiral	91
<b>Tabla 20.1.1.-</b> Rango de concentraciones en la curva patrón de calibrado	103
<b>Tabla 20.1.2.-</b> Caracterización de los ensayos caudal-tiempo	104
<b>Tabla 20.1.3.-</b> Caracterización de los ensayos con NaCl sin precalentamiento del alimento	104
<b>Tabla 20.1.4.-</b> Caracterización de los ensayos con NaCl con precalentamiento del alimento	104
<b>Tabla 20.1.5.-</b> Caracterización de los ensayos con CuSO <sub>4</sub> y columna recta	105
<b>Tabla 20.1.6.-</b> Caracterización de los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> y columna recta	105
<b>Tabla 20.1.7.-</b> Caracterización de los ensayos con NiSO <sub>4</sub> y columna recta	105
<b>Tabla 20.1.8.-</b> Caracterización de los ensayos con K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> y columna recta	105
<b>Tabla 20.1.9.-</b> Caracterización de los ensayos con K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> en columna recta a distintas temperaturas de calefacción	106
<b>Tabla 20.1.10.-</b> Caracterización de los ensayos con NaCl en columna recta	106
<b>Tabla 20.2.1.-</b> Caracterización de los ensayos de disoluciones de NaCl con rotavapor	106
<b>Tabla 20.3.1.-</b> Caracterización de los ensayos con agua destilada	106
<b>Tabla 20.3.2.-</b> Caracterización de los ensayos por incrementos con NaCl y distintas configuraciones del aparato evaporador	107
<b>Tabla 20.3.3.-</b> Caracterización de los ensayos en continuo con NaCl y distintas configuraciones del aparato evaporador	107

<b>Tabla 20.3.4.-</b> Caracterización de los ensayos con agua destilada para la comprobación de recuerdos con intercambiador de doble columna en espiral	107
<b>Tabla 20.3.5.-</b> Caracterización de los ensayos con $\text{CuSO}_4$ y doble columna en espiral	107
<b>Tabla 20.3.6.-</b> Caracterización de los ensayos con $\text{ZnSO}_4$ y doble columna en espiral	108
<b>Tabla 20.3.7.-</b> Caracterización de los ensayos con $\text{NiSO}_4$ y doble columna en espiral	108
<b>Tabla 20.3.8.-</b> Caracterización de los ensayos con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ y doble columna en espiral	108
<b>Tabla 20.3.9.-</b> Caracterización de los ensayos con $\text{CaCl}_2$ y doble columna en espiral	108
<b>Tabla 22.1.1.-</b> Rango de valores ensayados en las pruebas preliminares de funcionamiento	114
<b>Tabla 24.11.-</b> Relación de referencias de los ensayos realizados con intercambiador de columna recta y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en función de su concentración inicial	137
<b>Tabla 24.12.-</b> Relación de referencias de los ensayos realizados con intercambiador de doble columna en espiral y $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en función de su concentración inicial	139
<b>Tabla 26.1.1.-</b> Rango de valores ensayados en las pruebas preliminares de funcionamiento	145
<b>Tabla 27.1.-</b> Apuntes energéticos del glosario de términos	159
<b>Tabla 27.2.-</b> Diversas ecuaciones matemáticas para la determinación teórica de $h_c$	162
<b>Tabla 28.1.-</b> Datos previos intercambiador columna recta	167
<b>Tabla 28.2.-</b> Valores habituales de los coeficientes de transmisión por convección y de ensuciamiento en evaporadores. Kreith, F. 1999	168
<b>Tabla 28.3.-</b> Valores habituales de coeficientes de transmisión por convección para evaporadores. Kakaç, S. 1998	169
<b>Tabla 29.1.-</b> Datos previos del intercambiador de doble columna en espiral	175
<b>Tabla 29.2.-</b> Valores habituales de los coeficientes de transmisión por convección y de ensuciamiento en evaporadores. Kreith, F. 1999	176
<b>Tabla 29.3.-</b> Valores habituales de coeficientes de transmisión por convección para evaporadores. Kakaç, S. 1998	176
<b>Tabla 30.1.-</b> Síntesis de resultados de los cálculos energéticos	183
<b>Tabla 30.2.</b> Comparativa de caudales teóricos y experimentales	185
<b>Tabla 30.3.-</b> Comparativa de pérdidas de calor en los montajes ensayados y rendimientos energéticos	185

<b>Tabla 32.1.-</b> Datos de partida de las consideraciones económicas MEPA #1	191
<b>Tabla 32.1.1.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 para intercambiador de columna recta	192
<b>Tabla 32.1.2.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 para intercambiador de columna recta	192
<b>Tabla 32.1.3.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 para intercambiador de columna recta	192
<b>Tabla 32.2.1.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 para intercambiador de columna recta en consideración de energía térmica gratuita	193
<b>Tabla 32.2.2.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 para intercambiador de columna recta en consideración de energía térmica gratuita	193
<b>Tabla 32.2.3.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 para int. de columna recta en consideración de energía térmica gratuita	193
<b>Tabla 32.3.1.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba TELSTAR RD18	195
<b>Tabla 32.3.2.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR RD18	196
<b>Tabla 32.3.3.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a bajo gratuita, con bomba TELSTAR S-4	197
<b>Tabla 32.3.4.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR S-4	197
<b>Tabla 32.3.5.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba KNF Neuberger N 035.3	198
<b>Tabla 32.3.6.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba KNF Neuberger N 035.3	198
<b>Tabla 33.1.-</b> datos de partida de las consideraciones económicas MEPA #2	199
<b>Tabla 33.1.1.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 con intercambiador de doble columna en espiral	199
<b>Tabla 33.1.2.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 con intercambiador de doble columna en espiral	200
<b>Tabla 33.1.3.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger	

N 035.3 con intercambiador de doble columna en espiral	200
<b>Tabla 33.2.1.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 con intercambiador de doble columna en espiral en consideración de energía térmica gratuita	200
<b>Tabla 33.2.2.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 con intercambiador de doble columna en espiral en consideración de energía térmica gratuita	201
<b>Tabla 33.2.3.-</b> COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 con intercambiador de doble columna en espiral en consideración de energía térmica gratuita	201
<b>Tabla 33.3.1.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba TELSTAR RD18	203
<b>Tabla 33.3.2.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR RD18	203
<b>Tabla 33.3.3.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba TELSTAR S-4	204
<b>Tabla 33.3.4.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR S-4	205
<b>Tabla 33.3.5.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba KNF Neuberger N 035.3	205
<b>Tabla 33.3.6.-</b> OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba KNF Neuberger N 035	206
<b>Tabla 34.1.-</b> Resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida	207
<b>Tabla 34.2.-</b> Resultados económicos sintetizados considerando la energía térmica consumida gratuita	208
<b>Tabla 34.3.-</b> Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida	209
<b>Tabla 34.4.-</b> Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando la energía térmica consumida gratuita	210

## Índice de Figuras

---

<b>Figura 1.1.-</b> Esquema básico de las tareas realizadas	4
<b>Figura 5.1.-</b> Úlcera por contacto dérmico con Cromo en la preparación de cemento	18
<b>Figura 7.1.-</b> Representación gráfica de la evolución de la presión de vapor para el agua pura en mm Hg	38
<b>Figura 7.2.-</b> Croquis de evaporadores horizontales	40
<b>Figura 7.3.-</b> Croquis de un evaporador vertical	41
<b>Figura 8.1.3.-</b> Esquema de una planta de osmosis inversa	48
<b>Figura 10.1.-</b> Esquema de una planta de evaporación súbita multietapa	60
<b>Figura 11.1.-</b> Esquema de una planta de evaporación por efectos múltiples	62
<b>Figura 12.1.-</b> Esquema de una planta de evaporación por compresión de vapor	64
<b>Figura 17.1.-</b> Diagrama detallado del proceso investigador	81
<b>Figura 18.1.-</b> Croquis general del MEPA utilizado	84
<b>Figura 18.2.-</b> Calefactor	85
<b>Figura 18.3.-</b> Bomba impulsora	85
<b>Figura 18.4.-</b> Bomba de vacío KNF NEUBERGER N 035.3	88
<b>Figura 18.5.-</b> Croquis general MEPA #1	91
<b>Figura 18.6.-</b> Vista general del MEPA #1	91
<b>Figura 18.7.-</b> Croquis general MEPA #2	92
<b>Figura 18.8.-</b> Vista general MEPA #2	92
<b>Figura 18.9.-</b> Refrigerador en funcionamiento	93
<b>Figura 18.10.-</b> Matraz colector en funcionamiento	94
<b>Figura 18.13.-</b> Distintas configuraciones MEPA #1 utilizadas	95
<b>Figura 18.14.-</b> Distintas configuraciones MEPA #2 utilizadas	99
<b>Figura 21.1.-</b> Conductímetro CRISON GLP 31 y sonda	109
<b>Figura 21.2.-</b> Tubos de ensayo con muestras de CuSO <sub>4</sub> . Labs. TECAR	110
<b>Figura 23.1.1.-</b> Tiempo de duración del proceso de destilación de 150 ml de agua en función del caudal de calefacción a 80°C y 60 cm Hg	115

<b>Figura 23.1.2.-</b> Evolución de las temperaturas “A” y “B” de control según el caudal de calefacción, a 80°C y 60 cm Hg	116
<b>Figura 23.2.1.-</b> Resultados de los ensayos de destilación con rotovapor de una disolución de NaCl de 5g/l en distintas condiciones de presión y 80°C de temperatura de calefacción	117
<b>Figura 23.2.2.-</b> Resultados de los ensayos de destilación con rotovapor de una disolución de NaCl de 5g/l en distintas condiciones de presión y 85°C de temperatura de calefacción	117
<b>Figura 23.3.1.-</b> Variación de la concentración del líquido alimento (concentrado) al inicio y final de cada recarga con intercambiador de columna simple y disolución de 10 g/l NaCl a 80°C y 60 cm Hg. a) sin precalentamiento; b) con precalentamiento	119
<b>Figura 23.3.2.-</b> Valores medios de concentración de NaCl en destilado para ensayos a 80°C y 60 cm Hg en función a la concentración inicial de la disolución alimento	120
<b>Figura 23.3.3.-</b> Tiempo medio de duración de ensayos de 5 recargas con disoluciones de entre 5 y 30 g/l a 80°C y 60cm Hg con y sin precalentamiento	120
<b>Figura 23.4.1.-</b> Caudales en ensayos con doble columna espiral a distintas temperaturas de calefacción, 60 cm Hg y caudal de agua caliente de 0,75 l/min	121
<b>Figura 23.4.2.-</b> Caudales en ensayos con doble columna espiral a distintas presiones de vacío y caudal de agua caliente de 3 l/min a 65°C	121
<b>Figura 24.1.1.-</b> Curvas de calibrado	123
<b>Figura 24.2.1.-</b> Caudales del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando por recargas a 50°C y 63-64 cm Hg	124
<b>Figura 24.2.2.-</b> Conductividades del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando por recargas a 50°C y 63-64 cm Hg	124
<b>Figura 24.3.1.-</b> Caudales del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando en continuo a 50°C y 63-64 cm Hg	125

<b>Figura 24.3.2.-</b> Conductividades del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando en continuo a 50°C y 63-64 cm Hg	125
<b>Figura 24.4.1.-</b> Concentración de NaCl en el destilado y en el líquido problema derivada de la existencia de recuerdos de ensayos anteriores	126
<b>Figura 24.5.1.-</b> Evolución de la depresión media en cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en el intercambiador de columna recta vertical	127
<b>Figura 24.5.2.-</b> Evolución de las temperaturas de volatilización de cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en el intercambiador de columna recta vertical	127
<b>Figura 24.5.3.-</b> Conductividad media inicial y final del concentrado en ensayos con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	128
<b>Figura 24.5.4.-</b> Volúmenes destilados en ensayos con CuSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	128
<b>Figura 24.6.1.-</b> Evolución de la depresión media en cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en el intercambiador de doble columna en espiral	129
<b>Figura 24.6.2.-</b> Evolución de las temperaturas medias en cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en el intercambiador de doble columna en espiral	129
<b>Figura 24.6.3.-</b> Conductividades del concentrado en ensayos con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	130
<b>Figura 24.6.4.-</b> Volúmenes destilados en ensayos con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	130
<b>Figura 24.7.1.-</b> Conductividades medias del líquido alimento al inicio y final de los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	131
<b>Figura 24.7.2 .-</b> Volúmenes destilados en los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	131
<b>Figura 24.7.3.-</b> Conductividades de destilado en los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	132
<b>Figura 24.8.1.-</b> Conductividades medias del líquido al inicio y final de los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	133
<b>Figura 24.8.2.-</b> Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	133

<b>Figura 24.8.3.-</b> Conductividades del destilado en los ensayos con ZnSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	134
<b>Figura 24.9.1.-</b> Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con NiSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	135
<b>Figura 24.9.2.-</b> Conductividades del destilado en los ensayos con NiSO <sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical	135
<b>Figura 24.10.1.-</b> Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con NiSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	136
<b>Figura 24.10.2.-</b> Conductividades del destilado en los ensayos con NiSO <sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral	136
<b>Figura 24.11.1.-</b> Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en intercambiador columna recta	138
<b>Figura 24.11.2.-</b> Conductividad del destilado obtenido en los ensayos con K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en intercambiador columna recta	138
<b>Figura 24.12.1.-</b> Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en int. de doble columna en espiral	139
<b>Figura 24.12.2.-</b> Conductividad del destilado obtenido en los ensayos con K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en int. de doble columna en espiral	140
<b>Figura 25.1.1.-</b> Evolución de la concentración en el líquido problema a concentración inicial de 1N frente al tiempo, a distintas temperaturas y 60 cmHg de vacío en intercambiador de columna recta vertical	141
<b>Figura 25.1.2.-</b> Evolución por recargas de la concentración en el líquido problema a concentración inicial de 1N, a distintas temperaturas y 60 cm Hg de vacío en intercambiador de columna recta vertical	142
<b>Figura 25.2.1.-</b> Evolución por recargas de la concentración del líquido alimento en ensayo con concentración inicial de 10 g/l de CaCl <sub>2</sub> a 65°C y 60 cm Hg en intercambiador de doble columna en espiral	142
<b>Figura 25.3.1.-</b> Fragmento de la evolución por recargas de la concentración en el líquido alimento en intercambiador de columna recta vertical a 65°C y 60 cm Hg con concentración inicial de 3 g/l de NaCl	143

<b>Figura 25.3.2.-</b> Caudales de destilado obtenidos en los ensayos realizados con diferentes concentraciones de partida de NaCl en intercambiador de columna recta vertical a 65°C y 60 cm Hg	144
<b>Figura. 25.3.3.-</b> Conductividades del destilado obtenido en los ensayos realizados con diferentes concentraciones de partida de NaCl en intercambiador de columna recta vertical a 65°C Y 60 cm Hg	144
<b>Figura 26.1.-</b> Tiempo de duración del proceso de destilación de 150 ml de agua según el caudal de calefacción a 80°C y 60 cmHg	146
<b>Figura 26.2.-</b> Relación entre el caudal destilado y la temperatura de calefacción en intercambiador de doble columna en espiral a presión de vacío y caudal de calefacción constantes y de valores 60cm Hg y 0,75 l/min respectivamente	147
<b>Figura 26.3.-</b> Evolución del volumen destilado con un rotavapor a distintas presiones de vacío, 80°C de temperatura Y 5 g/l de concentración inicial de NaCl	148
<b>Figura 26.4.-</b> Tiempo medio de duración de ensayos de 5 recargas con disoluciones de NaCl de entre 5 y 30 g/l a 80°C y 60cm Hg con y sin precalentamiento	148
<b>Figura 26.5.-</b> Caudales destilados en intercambiador de columna recta en función del caudal de calefacción a 65°C y 64 cm Hg	149
<b>Figura 26.6.-</b> Caudales destilados en las distintas configuraciones de intercambiador utilizadas en las condiciones más favorables de funcionamiento	150
<b>Figura 26.7.-</b> Análisis box and wisker de los valores de conductividades del destilado obtenido para cada configuración utilizada	151
<b>Figura 26.8.-</b> Ajuste lineal de la evolución de la concentración en el líquido alimento durante la evolución de dos ensayos tipo en intercambiador de columna recta vertical a 80°C y 60 cm Hg. a) 5 g/l de NaCl b)10 g/l de NaCl	152
<b>Figura 26.9.-</b> Análisis estadístico de la relación entre la concentración inicial del líquido alimento y la duración de los ensayos, para los ensayos realizados con NaCl a concentraciones de entre 5 y 30 g/l, a 60 cm Hg de vacío y 65°C con intercambiador de columna simple vertical	154
<b>Figura 26.10.-</b> Tiempo medio de duración de ensayos de 5 recargas con disoluciones de entre 5 y 30 g/l a 80°C y 60cm Hg con y sin precalentamiento previo del alimento en intercambiador de columna recta vertical	155

<b>Figura 26.11.-</b> Evolución del tiempo medio para la obtención de un litro de destilado con intercambiador de doble columna en espiral a 65 °C y 3 l/min de caudal de calefacción y distintas presiones de vacío	155
<b>Figura 26.12.-</b> Evolución del tiempo medio para la obtención de un litro de destilado con intercambiador de columna recta vertical a 65 °C y 0,75 l/min de caudal de calefacción y distintas presiones de vacío	156
<b>Figura 27.2.1.-</b> Representación gráfica de la actuación conjunta de la conducción y la convección en la transmisión de calor en un intercambiador de tubos concéntricos	162
<b>Figura 34.1.-</b> Resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida	208
<b>Figura 34.2.-</b> Resultados económicos sintetizados considerando la energía térmica consumida gratuita	209
<b>Figura 34.3.-</b> Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida	210
<b>Figura 34.4.-</b> Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando la energía térmica consumida gratuita	211

## Índice de Fórmulas

Ec. 27.4. Ley de Fourier	$Q = -k \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$	.....160
Ec.27.5. Ley de Stephan-Boltzman	$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4)$	.....160
Ec.27.6. Ley de enfriamiento de Newton	$Q = h \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$	.....161
Ec. 27.7. Dittus-Boelter	$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} \cdot Pr^n \leftrightarrow 10^4 \langle Re \rangle 10^6$	.....161
Ec. 27.8. Dittus-Boelter	$Nu_D = 0.027 Re_D^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \leftrightarrow 2300 \langle Re \rangle 10^4$	.....161
Ec. 27.9	$h_c = 3.66 \frac{k}{D}$	.....162
Ec. 27.10	$h_c = 0.023 \frac{v^{0.8} k^{0.6} (\rho \cdot cp)^{0.4}}{D^{0.2} v^{0.4}}$	.....162
Ec. 27.11	$h_c = 0.664 k \sqrt{\frac{V}{v \cdot L}} \cdot Pr^{1/3}$	.....162
Ec. 27.12	$U = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2 / r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)}$	.....163
Ec.27.12.1	$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + R_i \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2 / r_1)}{k} + R_o + \frac{1}{h_o}\right)}$	.....164
Ec. 27.13	$NuD = 1,86 \left[ \left(\frac{D}{L}\right) Re D \cdot Pr \right]^{1/3} * \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0.14} \leftrightarrow 0,48 \langle Pr \rangle 16700$	.....165
Ec. 27.14	$Nu = 0,36 (Re)^{0,55} (Pr)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_s}\right)^{0,14}$	.....165
Ec. 27.15	$\Delta P = \frac{G_t^2}{\rho \cdot g} \cdot Pr \cdot \left[ \frac{f_i}{D_i} + 2 \right] \cdot \frac{1}{10000} (kg / cm^2)$	.....165
Ec. 27.16	$f_i = 0,0028 + 0,25 (Re)^{-0,32}$	.....165

Ec. 27.17	$Nu = \frac{h_0 D_e}{k} = 0.36 \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)^{0.55} \cdot \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right)$	166
Ec. 27.18	$h_{sp} = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \frac{k}{Dh}$	166
Ec. 27.18.1	$De = \frac{4 \cdot Areaanular}{Pm}$	169
Ec. 27.19	$Re = \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right) = 2701$	169
Ec. 27.20	$Q_{transmiti do} = A_o \cdot U_o \cdot \Delta T_{ml}$	171
Ec. 27.21	$Q_{calef} = m_c \cdot c_p \cdot \Delta T_c$	171
Ec. 27.22	$Q_{disolucion} = m_d \cdot c_p \cdot \Delta T_d + m_d \cdot c_v$	171
Ec. 27.23	$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left( \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}$	172
Ec. 27.24	$A_o = 2\pi R_o \cdot L$	172
Ec. 27.25	$\Delta Q = \frac{Q_{disolucion} - Q_{calef}}{Q_{calef}} \cdot 100$	172
Ec. 27.26	$S = 2 \cdot \sum \pi r^2$	177
Ec. 27.27	$Pm = 2 \cdot \sum 2\pi r$	177
Ec. 27.28	$R_{ml} = \frac{R_2 - R_1}{\ln \left( \frac{R_2}{R_1} \right)}$	179
Ec. 27.29	$L_{tot} = N \cdot V \sqrt{(2\pi R_{ml})^2 + h^2}$	179
Ec. 27.30	$A_o = 2\pi \cdot R_o \cdot L_{tot}$	180

## Índice de Símbolos

---

A = Área o superficie. ( $m^2$ )

$c_p$  = Calor específico de un líquido ( $J/Kg \cdot ^\circ C$ )

$c_v$  = Calor latente de evaporación de un líquido ( $J/Kg \cdot ^\circ C$ )

C = Capacidad térmica de flujo ( $W/^\circ C$ )

D,  $D_e$  o  $D_h$  = Diámetro o diámetro equivalente (m)

$\delta$  = Densidad ( $Kg/m^3$ )

$\varepsilon$  = Eficiencia (adim)

F = caudal (generalmente en l/min o l/h)

$F_c$  = Caudal de calefacción (entre 0,75 y 3 l/min)

$f_i$  = Factor lineal de pérdida de carga (adimensional)

g = Gravedad en la Tierra ( $9,8 m/s^2$ )

Gs = Producto de la velocidad por la densidad de un fluido (para la determinación del número de Reynolds. Se expresa en  $Kg/s \cdot m^2$ )

$h_c, h_i, h_o$  = Coeficientes individuales de transferencia de calor por convección. Coeficientes general, interno y externo respectivamente. ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$\Delta H$  = Entalpía ( $J/Kg$ )

$\Delta H_v$  = Entalpía de evaporación ( $J/Kg$ )

H = Altura (m)

k = Coeficiente de conducción térmica de un material ( $W/m \cdot ^\circ C$ )

L = Longitud (m)

m = Caudal másico ( $Kg/s$ )

NUT = Número de unidades térmicas (adim)

$Nu$  = Número de Nusselt (adim)

P = Presión de vacío o depresión suministrada al sistema (cm Hg).

$P_m$  = Perímetro (m)

Pr = Número de Prandtl (adim)

Q = Calor transmitido (W)

$Q_{transmitido}$  = Calor que pasa de un fluido a otro en un intercambiador de calor (W)

$Q_{\text{calef}}$  = Calor que el agua de calefacción cede en un intercambiador (W)

$Q_{\text{disolución}}$  = Calor que gana el líquido alimento dentro de un intercambiador de calor (W)

R = Radio (m)

Re = Número de Reynolds (adim)

$R_{\text{ml}}$  = Radio medio logarítmico

$R_o, R_i$  = Factores de ensuciamiento externo e interno respectivamente ( $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ )

S = Espesor de la película de líquido en una pared (m)

$T^a$  = Temperatura ( $^\circ\text{C}$  o K)

$T_c$  = Temperatura del líquido de calefacción ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{\text{alim}}$  = Temperatura del líquido alimento previa entrada al modelo ensayado ( $^\circ\text{C}$ )

$\Delta T_{\text{ml}}, \theta$  = Temperatura media logarítmica ( $^\circ\text{C}$ )

$\Delta T, \theta$  = Variación de temperatura entre dos puntos ( $^\circ\text{C}$ )

$U_o$  = Coef. global de transm. de calor en pared externa del intercambiador ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ )

$\sigma$  = Constante de Stephan-Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

V = Volumen ( $\text{m}^3$ )

$\nu$  = Viscosidad cinemática ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\mu$  = Viscosidad absoluta ( $\text{s} \cdot \text{m}/\text{kg}$ ).

### **Subíndices utilizados:**

alim = Referente al líquido alimento introducido en el modelo ensayado

b = Ebullición

c = Referente al líquido de calefacción

d = Disolución

e = Equivalente

k = Condensado

i = Interior / de entrada

l = Líquido

o = Exterior / de salida

sp = "Single Phase" o fase única generalmente líquida

v = Vapor

w = Agua en estado líquido

## Glosario de Términos

---

**MEPA:** Modelo evaporador de película ascendente. Es el modelo que se ha empleado para la realización de la investigación que se presenta. Se ha trabajado con dos versiones del mismo denominadas MEPA #1 y MEPA #2 que representan dos opciones diferentes de funcionamiento del evaporador.

**Temperatura del baño:** Representa la temperatura de entrada del líquido calefactor al sistema intercambiador. Esta temperatura viene expresada en grados centígrados.

**Vacío:** Depresión suministrada al sistema evaporador mediante la bomba de vacío correspondiente. En las tablas de resultados este vacío se expresa en centímetros de mercurio. Nótese que se hace referencia al vacío generado y no a la presión existente en el interior del sistema.

**Nº de Recarga.** También se le denomina rellenada en algunas tablas. Número de veces que se ha introducido una carga del líquido alimento en el MEPA, durante un ensayo por recargas.

**Presión de vacío instantánea.** Este término expresa el vacío aplicado al MEPA en un momento determinado, expresado en centímetros de mercurio.

**Temperatura A.** Expresa la temperatura de la mezcla líquido-vapor inmediatamente en la salida del intercambiador de calor. Esta temperatura puede sufrir ligeras variaciones durante el tiempo que dura un ensayo.

**Temperatura B.** Valor de la temperatura de la fase vapor, inmediatamente antes de su entrada en el sistema de refrigeración para su cambio de estado. Esta temperatura tiende a ser más estable que la anteriormente citada.

**Temperatura C.** En los ensayos realizados con el MEPA #2, se ha anotado también la temperatura de entrada del líquido recirculado en el MEPA. Este valor muestra la temperatura a la que vuelve a entrar el líquido en el intercambiador de calor tras recirculación del mismo.

**Concentraciones:** En las tablas de ensayos se presentan dos columnas que expresan las concentraciones del líquido alimentado en el aparato evaporador de película ascendente. En la primera columna se muestra la concentración al inicio de cada intervalo o recarga. En la segunda columna se muestra la concentración al final de los citados intervalos. Estas concentraciones se expresan en mg/l.

**Conductividades:** Expresadas con la letra “K” son los valores de conductividad de las distintas muestras de líquidos extraídas del MEPA durante la evolución de un ensayo y vienen expresadas en mS/cm. Las conductividades pueden pasarse a concentraciones y viceversa utilizando las correspondientes curvas de calibrado, puesto que  $C = f(K)$ . Tras esto, conociendo las concentraciones iniciales, puede calcularse la concentración final para cada recarga utilizando la siguiente expresión:

$$V_1 \cdot C_1 = V_{1-x} \cdot C_{1-x} + V_x \cdot C_x$$

**Volumen destilado:** Valor en mililitros del volumen total destilado al final de cada ensayo.

**Conductividad del destilado:** Valor de conductividad del destilado obtenido. Este valor ha de ser necesariamente muy bajo y en caso de no serlo indica claramente un fallo en el funcionamiento del sistema. Se expresa, en las tablas de ensayos, en  $\mu\text{S/cm}$ .

**Volumen de recarga:** Indica el volumen que se añade al sistema en cada recarga realizada. Se expresa en ml.

**Conductividad de la recarga:** Expresa la conductividad en mS/cm del líquido alimento con el que se recarga el aparato evaporador en cada ciclo.

**Caudal de refrigeración:** Es el valor del caudal de agua de refrigeración utilizado para el enfriamiento y cambio de fase del vapor obtenido en el intercambiador de calor. Este valor es fijo para todos los ensayos y equivale a 350 ml/min.

**Caudal de calefacción:** Es el valor del caudal de agua caliente utilizado como elemento térmico en el intercambiador de calor. Su valor es distinto en las distintas tandas de ensayos realizadas dado que no siempre se ha requerido el mismo caudal calefactor. Los valores más utilizados son 0,75 l/min y 3 l/min.

**Caudal destilado:** Valor obtenido de la división entre el volumen total destilado y el tiempo total de duración del ensayo. Se expresa en ml/h.

**Calor latente de evaporación:** Energía en forma de calor que es necesario transmitir a un líquido para su cambio de estado. Para el caso del agua, este valor es de 536 cal/g.

**Número de Reynolds:** Número adimensional que establece el grado de turbulencia en la circulación de un fluido y obedece a la siguiente fórmula matemática

$$Re = \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)$$

donde  $D_e$  es el diámetro equivalente de la conducción que transporta al fluido,  $G_s$  es el producto de la velocidad por la densidad del fluido y  $\mu$  es la viscosidad absoluta.

**Número de Prantdl:** Número adimensional que establece la relación entre el componente cortante de la difusividad y la difusividad térmica. Obedece a la siguiente fórmula:

$$Pr = \frac{\mu / \rho}{k / (\mu \cdot Cp)} = \frac{Cp \cdot \mu}{k}$$

donde  $Cp$  es el calor específico del fluido y  $k$  es el coeficiente de transmisión del calor por conducción de dicho fluido.

**Número de Nusselt:** Número que relaciona el coeficiente de transmisión del calor por convección con la conductividad térmica del fluido y con el diámetro equivalente de la conducción por la que se transporta el fluido.

$$Nu = \frac{h \cdot D_e}{k}$$

donde todos los parámetros que conforman la citada expresión matemática son ya conocidos.

# ANTECEDENTES

---

I

1. Introducción

3

2. Antecedentes

5



## 1.- Introducción

---

El documento que se presenta es la descripción de los trabajos de investigación realizados por el autor para la obtención del Título de Doctor, que han sido dirigidos por los Profesores Doctores D<sup>a</sup> Esperanza García Castelló y D. Julián Lebrato Martínez y que llevan por título “Evaluación del rendimiento de recuperación de vertidos contaminados por iones de metales pesados mediante técnicas evaporativas. Análisis energético y económico.” desarrollados dentro del programa de doctorado “Tecnología de membranas, electroquímica y medio ambiente, seguridad nuclear” que imparte el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia.

La presente Tesis Doctoral se ha desarrollado dentro de una de las varias líneas de investigación en las que, en la actualidad, se está trabajando en el grupo de investigación TECAR, dirigido por el Prof. D. José García Garrido y ha contado en todo momento con el apoyo personal y material del grupo.

La Tesis Doctoral “Evaluación del rendimiento de recuperación de vertidos contaminados por iones de metales pesados mediante técnicas evaporativas. Análisis energético y económico.” pretende probar desde los puntos de vista técnico, energético, económico y medioambiental, la validez de los procedimientos térmicos para la descontaminación de aguas con iones metálicos en el supuesto de disponer de un aporte energético de bajo coste procedente de caudales de agua caliente residuales de tipo industrial. Con ello se consigue no sólo valorizar el agua caliente residual sino también mejorar la economía de los procedimientos térmicos de descontaminación de aguas, potenciándolos en estos usos.

Los trabajos realizados han seguido una planificación general que ha consistido, en primer lugar, en el diseño y puesta en marcha de un Modelo de Evaporación por Película Ascendente (MEPA), para posteriormente realizar la optimización de las variables del proceso, la ejecución de baterías de ensayos para las distintas configuraciones utilizadas y las distintas disoluciones metálicas experimentadas, las

determinaciones energéticas teóricas y prácticas, las consideraciones económicas y por último la obtención de conclusiones y redacción del presente documento.

Se presenta a continuación un esquema básico de las tareas realizadas en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral, que será detallado convenientemente en apartados posteriores:

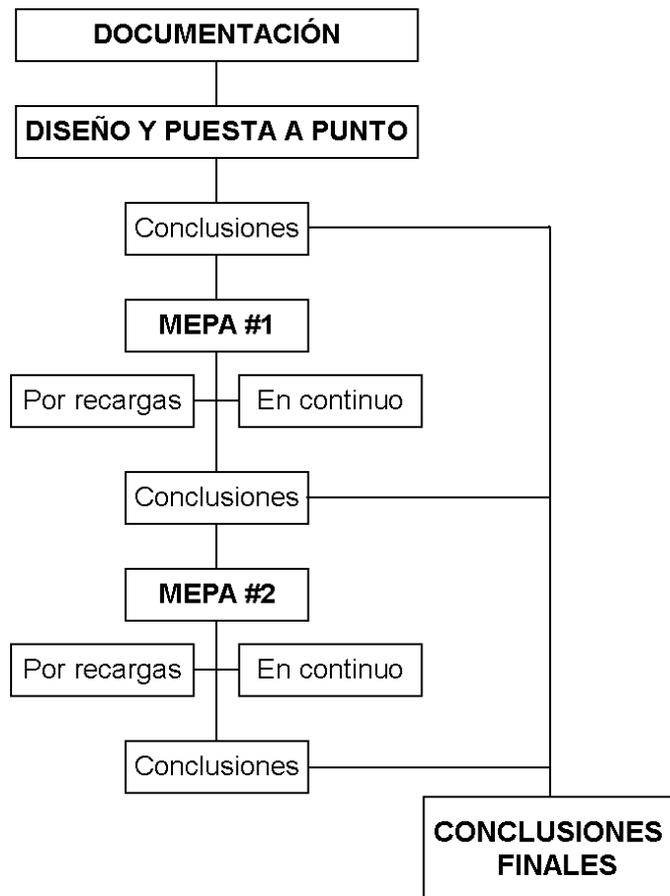


Figura 1.1.- Esquema básico de las tareas realizadas

## 2.- Antecedentes

---

Es evidente hoy en día que la escasez de agua limpia en el planeta es un problema de gran importancia para la humanidad. La población mundial ha crecido mucho en las últimas décadas, pasando de 3.000 millones en la década de 1960 a más de 6.000 millones de habitantes en la actualidad. De esta considerable población, apenas una cuarta parte de ella dispone de agua corriente en sus hogares y más 1.100 millones de personas no tienen acceso al agua potable (Naciones Unidas, 2002). Este es un dato que ha hecho saltar todas las alarmas en las principales organizaciones sociales del planeta y tan sólo los países desarrollados pueden, con su tecnología y capital, llevar a cabo actuaciones tendentes al ahorro de agua en los lugares donde ésta se utiliza y la facilitación de este recurso donde el agua escasea.

De aquí que exista un mercado del agua y que ésta tenga un precio, que por lo tanto hace interesante la consideración de aspectos económicos en el uso y aplicación de este bien primario. Así, se sabe que dentro de los usos mundiales del agua en el planeta, la industria consume en torno al 23% del total de agua disponible para usos consuntivos (UNESCO, 2003). Es por esto por lo que se entiende que la problemática ambiental del agua a escala mundial justifica de manera general el interés de la investigación realizada y en especial el ahorro y valorización de las aguas industriales.

Además, uno de los problemas que con más frecuencia se presenta en el medio ambiente actual es el de la contaminación de las aguas continentales con iones de metales pesados. Dentro de éstos, destacan especialmente los desastres naturales derivados de actuaciones humanas poco responsables, como los ocurridos en la cuenca del Guadiamar y en el parque nacional de Doñana (Sevilla) provocado por los vertidos de la empresa Boliden (ver Anexo IV), o la contaminación minera en Rio Tinto (Huelva) por poner tan sólo algunos ejemplos de este tipo de incidentes en la Península Ibérica.

Debe considerarse también la potencial valorización de los residuos procedentes de otros usos (industriales, energéticos...) para los procedimientos térmicos de

descontaminación de aguas y el consiguiente beneficio que esto supone para el medio ambiente. El aprovechamiento de los caudales residuales de agua caliente generados en un amplio espectro de industrias supone un considerable ahorro energético que potencia la validez de estos procedimientos. La industria de la galvanotecnia y los recubrimientos electrolíticos, además de ser uno de los focos de contaminación de las aguas por metales, sirve como ejemplo de potencial valorización de los caudales de agua caliente generados, pues tanto en los baños como en los procesos de lavado y decapado se emplean corrientes de agua a temperaturas entre 50°C y 90°C (IHOBE, 1997) que posteriormente es preciso enfriar para poder ser eliminadas o enviadas a tratamiento. También las industrias del sector cerámico presentan caudales residuales de agua caliente potencialmente aprovechables para el procedimiento descontaminador ensayado.

Con esto, se plantea una línea de investigación, en la que se ha desarrollado la Tesis Doctoral que se presenta, que pretende lograr mediante procedimientos asumibles técnicamente, la descontaminación de este tipo de aguas con un coste razonable, así como con las máximas ventajas posibles para el entorno natural mediante la utilización de tecnologías evaporativas.

Es dentro de esta línea investigadora donde se enmarcan las directrices que han guiado esta Tesis Doctoral que han sido las siguientes:

- La utilización de tecnologías evaporativas para la recuperación de aguas contaminadas con iones de metales pesados.
- El aprovechamiento de una fuente residual de calor como es el agua saliente de determinados procesos industriales de tipo térmico.
- La disminución de la carga contaminante mediante la concentración de los metales hasta un nivel suficiente para ser aprovechados o bien para ser eliminados como residuo de manera controlada y más económica.

# PROBLEMÁTICA MEDIOAMBIENTAL DE LOS METALES

---

3. Generalidades	9
4. Fenómenos de transporte de los metales	11
5. El impacto de los metales en los seres vivos	15



### 3.- Generalidades

---

Desde el gran salto que en todos los aspectos imaginables supuso la Revolución Industrial hasta la actualidad, el ser humano ha alterado progresiva pero también profundamente el ciclo de los metales en el planeta. Los metales, que antaño estaban confinados en determinados reservorios naturales (rocas, sedimentos...) y tenían unos ciclos naturales concretos han sufrido un importante cambio debido a la actuación humana.

A modo de definición, comúnmente se emplea el término metales pesados para denominar los elementos metálicos de la tabla periódica que tienen una densidad mayor o igual a  $5 \text{ g/cm}^3$  (Babor, J.A.; Ibarz, J. 1960)

Estos metales han aparecido en cantidades anormalmente elevadas en el suelo, el agua y el aire y de ahí han pasado a formar parte de las cadenas tróficas de las cuales antes tan sólo eran oligoelementos. Actividades como la construcción, la minería y muchos procesos industriales han sido las principales causantes de modificaciones a gran escala del medio ambiente y en especial de las tasas de liberación de elementos metálicos en la biosfera.

Una vez liberados, el destino de los metales debe ser evaluado ya que no resultan igual de peligrosos si se depositan en cauces continentales que si lo hacen en tierra firme o en el mar. En los ríos, sobre todo si éstos presentan el más mínimo problema de acidez, los metales pueden resultar extremadamente tóxicos para la ictiofauna. Además hay que tener en cuenta que los metales generalmente vienen acompañados de otros residuos como cenizas volantes que al caer en ríos y lagos pueden alterar mucho el pH de éstos.

En lo referente al transporte de metales, es interesante destacar que estos elementos metálicos liberados pueden afectar a organismos y ecosistemas localizados en áreas muy lejanas al punto de emisión, ya que existen determinados complejos metálicos que resultan fácilmente transportables por el viento o por corrientes de agua.

Por otra parte, la abundancia de metales en la corteza terrestre es muy elevada, debido a la composición natural de ésta, pero por fortuna, la disponibilidad de estos metales no lo es tanto, ya que en pequeñas cantidades resultan beneficiosos pero en concentraciones algo mayores pueden resultar muy perjudiciales para el ecosistema. La disponibilidad de los metales traza está relacionada con varios factores, entre los que destaca el grado y tipo de acomplejamiento que presenten, el pH del medio, la solubilidad...

Los metales, generalmente se presentan en estado de oxidación positivos y algo electrófilos. De este modo, se dice que están estabilizados ya que se presentan asociados a átomos de otros elementos ricos en electrones, formando enlaces difíciles de romper con elementos como O, N y S. Estos enlaces son muy frecuentes en los compuestos metálicos presentes en ríos y lagos. Pero existe una gran diferencia de comportamiento entre los compuestos metálicos y los iones metálicos. Incluso existe diferencia de comportamiento en función del estado de oxidación en que el metal se presente. Así, las reacciones de oxidación/reducción pueden provocar cambios muy importantes en la concentración de metales, en el modo de presentación e incluso en su tasa de transporte.

#### 4.- Fenómenos de transporte de los metales

---

Los metales, como cualquier otro elemento presente en la corteza terrestre, puede ser transportado de un lugar a otro por diversas vías o métodos. En las siguientes líneas se presenta una síntesis de las más destacables para el caso de los elementos y compuestos metálicos:

##### **Volatilización.**

Uno de los fenómenos de transporte de metales traza es el de **la volatilización**. La mayor parte de los metales no son volátiles, pero existen algunos que en determinadas condiciones de presión y temperatura pueden cambiar de estado. Metales como Hg, As, Pb y Zn son relativamente volátiles y pueden ser transportados por el viento hasta otros lugares donde precipitan junto a las gotas de lluvia o en forma de precipitación seca.

La volatilización también puede ocurrir a partir de disoluciones de compuestos metálicos en agua u otros disolventes. En este caso, la diferencia de presiones parciales del compuesto en agua y aire provocan la volatilización, por ejemplo, del Metilmercurio.

Un caso especial de volatilización lo presentan el plomo y el mercurio: El primero porque, con las gasolinas de antaño, se volatilizaba a partir de la combustión de gasolina con plomo y se ha difundido por allí por donde pase una carretera. El segundo, por su baja presión de vapor en el aire.

##### **Acomplejamiento.**

Otra opción para el transporte de metales es el del **acomplejamiento** de los mismos. Los metales pueden formar enlaces fuertes con moléculas de agua. Estos enlaces son lo suficientemente fuertes como para que exista una reorientación de las moléculas de agua más cercanas al ión metálico. De este modo, los iones se rodean de una cubierta de hidratación interna muy fuertemente unida a ellos y de otra externa menos fijada. En este estado de acomplejamiento los iones metálicos reciben el nombre de iones metálicos hidrolizados.

Además, algunas moléculas de agua asociadas a los iones metálicos pueden ser sustituidas por otras especies disueltas de modo que se formen compuestos muy complejos, llamados normalmente complejos multidentados o quelatos.

Las reacciones de acomplejamiento son fundamentales en los ciclos bioquímicos de los metales ya que gracias a ellos, es posible la eliminación de iones metálicos de aguas en los que estaban disueltos, además de darse la circunstancia de ser mucho menos tóxicos los compuestos quelados que aquellos simplemente hidrolizados.

Muchos de estos quelados son producidos por microorganismos para regular su hábitat. De ente ellos destacan los ácidos fúlvico y húmico resultantes de los procesos de descomposición de la materia orgánica y que contienen muchos radicales potencialmente acomplejables con elementos metálicos.

Los acomplejamientos pueden ser reversibles de modo que sirven como reguladores de la concentración de metales más o menos tóxicos en el agua de ríos y lagos.

### **Precipitación.**

Otra forma de transporte o eliminación de tóxicos metálicos en agua es la **precipitación**. La precipitación viene determinada por el producto de solubilidad y la concentración pero, en el medio natural, en el que se tienen en consideración los metales por su peligrosidad, también hay que considerar otros factores que influyen en el fenómeno de precipitación. Así, la acidez del medio en que se localice el metal también influirá en el estado en que dicho metal se encuentre.

Para valores bajos de pH, es decir, en aguas ácidas, los metales tienden a resolubilizarse, pasando a estar de nuevo biodisponibles. Por el contrario, en medio básico, valores de pH altos, los metales o compuestos metálicos disueltos tienden a precipitar, quedando en el fondo en forma de sedimento, poco disponibles biológicamente: menos peligrosos.

Un ejemplo claro de la importancia de lo anteriormente descrito es el caso particular de la eliminación de cianuros metálicos por precipitación.

### **Adsorción.**

Por otra parte, otro fenómeno de transporte o eliminación de metales en las aguas es la **adsorción** sobre la superficie de partículas. Ésta es un fenómeno en el que los metales u otros compuestos se ligan a la superficie de materiales adsorbentes como por ejemplo el carbón activo.

Los metales disueltos son adsorbidos con relativa facilidad por otros compuestos, ya sean éstos metálicos o no, generalmente óxidos o hidróxidos, presentes en los lechos de ríos y lagos. Esta adsorción, actúa como reguladora de la concentración de metales en las aguas, ya que las partículas adsorbentes pueden adsorber metales en disolución o dejar dichos iones libres en función a la concentración de metales presentes en el agua en cada momento. De este modo, la presencia de este fenómeno en ríos y lagos atenúa la acción de posibles vertidos puntuales y sirve de colchón y almacén de estos elementos.

Según Benjamin, M.M. y Honeyman, B.D. (1992), Los óxidos e hidróxidos metálicos se emplean como adsorbentes mientras que los iones metálicos son normalmente el material a adsorber. Aunque esto no quiere decir que otros materiales, óxidos o hidróxidos no metálicos no puedan ser excelentes adsorbentes de contaminantes iónicos.

Para comprender el fenómeno de la adsorción debe considerarse la existencia previa de una interfase sólido-disolución en la que los átomos disueltos en el agua se encuentran atrapados por el sólido pero están disponibles para reaccionar con otros componentes de la disolución. Esto ocurre con iones en disolución que emplean parte de sus electrones para asociarse a la superficie del sólido adsorbente y el resto para reaccionar con otros componentes.

También puede ocurrir que aparezcan en disolución nuevos iones electroquímicamente más afines a la superficie del adsorbente que los iones que en ese momento estuvieran adsorbidos por el mismo. Entonces lo que se produce es una sustitución de iones adsorbidos pasando a estar disueltos aquellos que antes no lo estaban y viceversa.

En general, la tendencia es a que los compuestos adsorbentes sean electroquímicamente negativos de manera que tengan afinidad por iones positivos. En caso de que la carga de

la materia adsorbente fuera positiva lo más común es que acabe adsorbiendo aniones de valencia superior a uno de modo que éstos dejen valencias libres en la parte exterior de la superficie de contacto. Con esto se tiene que la carga eléctrica del adsorbente pasa a ser negativa.

Por otra parte, existe una relación directa entre el pH de la disolución y la adsorción de iones metálicos, de modo que en entornos ácidos existe una redisolución de iones de metales mientras que en entornos básicos ocurre una adsorción de iones metálicos mientras que el comportamiento de los aniones y compuestos de carga negativa es el opuesto al explicado anteriormente.

## 5.- El impacto de los metales en los seres vivos

---

Como se ha descrito con anterioridad, los metales, pasan al agua, aire o suelo mediante fenómenos físicos, químicos, geológicos o biológicos y de allí pueden pasar a formar parte de la estructura molecular de animales y plantas.

El ser humano, con sus actuaciones, también favorece la presencia de grandes cantidades de metales en entornos donde antes no estaban presentes. Esto es debido principalmente a labores como la minería, el uso de pesticidas, las industrias madereras, la combustión de gasolinas, la industria metalúrgica, la electrónica y otros....

Aunque la presencia de metales pesados no implica necesariamente la existencia de una contaminación, en general, al superar determinadas concentraciones estimadas como normales, los metales pueden suponer un problema importante tanto en el aire como en el agua y el suelo.

Debido a la gran importancia que esta contaminación puede llegar a suponer así como las graves consecuencias toxicológicas que de éstas pueden llegar a derivarse, en este apartado se describen los principales impactos ambientales generados por la presencia de Cromo, Níquel, Zinc y Cobre en el medio natural. Metales éstos que han sido objeto de estudio en la presente Tesis Doctoral por ser frecuente su presencia en los efluentes de las industrias que contaminan con metales pesados, tales como las industrias de recubrimientos electrolíticos (Lowenheim, 1978) y también el sector cerámico.

### **Contaminación por Cromo:**

Existen fuentes naturales y antropogénicas de contaminación por Cromo.

- Fuentes naturales: Forma parte de minerales como crocoita y cromita. También se encuentra presente, como oligoelemento, en carnes y vísceras, así como en la levadura de cerveza y muchos

cereales y frutas. El cromo se encuentra presente también en el alcíbar, líquido viscoso que segrega el Aloe Vera al ser seccionado.

- Fuentes antropogénicas: Minas, galvanoplastia, curtido de pieles, textil, vidrio, explosivos, material de fotografía. Con el tiempo, el uso del Cromo en la industria va en aumento, siendo muy empleado en el recubrimiento y protección de piezas y materiales.

Debido a esto, las concentraciones normales de Cromo en la naturaleza oscilan entre 0,1 a 0,005  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de suelo.

En las empresas textiles, de curtidos y galvanotécnicas, se está haciendo un considerable esfuerzo para minimizar los efluentes líquidos contaminados con Cromo, debido a que son éstas las principales fuentes de contaminación medioambiental con este metal. Los baños gastados y las aguas de enjuague en las industrias galvanotécnicas pueden llegar a contener niveles de Cromo de entre 20 y 40  $\mu\text{g}/\text{l}$ , alcanzándose concentraciones de entorno a 5g/l en las aguas de los baños de cromado brillante.

El problema medioambiental principal de estas empresas radica en la escasa vida útil de los baños crómicos que se agotan con rapidez y soportan relativamente mal las dosificaciones de refuerzo, razón por la cual son desechados con frecuencia y sustituidos por baños nuevos.

Una de las problemáticas toxicológicas singulares del Cromo es que, debido a las particularidades específicas de las industrias que lo generan como residuo, éste no es vertido de manera aislada sino acompañado de una serie de agentes contaminantes que acentúan el impacto del Cromo sobre el medio ambiente. La sinergia en la afección medioambiental viene potenciada por la presencia de Cianuros, Níquel, Sulfatos y otros contaminantes en los vertidos con Cromo.

Este oligoelemento está presente en el organismo humano en cantidades muy pequeñas y actúa en él ayudando al aprovechamiento celular de la glucosa y proteínas, controlando y favoreciendo el crecimiento y desarrollo del individuo. Es indispensable en el tratamiento de las hipoglucemias ya que ayuda a la insulina a distribuir azúcar a

las células. El Cromo, controla el metabolismo del organismo y regula la presencia de ácidos grasos, colesterol y el correcto funcionamiento del material genético de las células. Por otra parte, debido a su función anticoagulante, en las dosis adecuadas ayuda a prevenir los ataques de corazón.

La cantidad de ingesta diaria recomendada de Cromo es de 50µg. Siendo la levadura de cerveza, , los aceites vegetales, el hígado de ternera y el marisco, los alimentos que más Cromo contienen.

En caso de carencia de Cromo en el organismo, caso relacionado con una alimentación insuficiente, aterosclerosis y situaciones de stress intenso, aparece una menor tolerancia a la glucosa, neuropatologías, disminución de nitrógeno en las células, disminuye la capacidad respiratoria del individuo, pérdida de peso, diabetes, enfermedades cardiovasculares y retrasos en el crecimiento de niños y jóvenes. De su ausencia en el organismo también pueden derivarse cuadros de opacización de córnea que pueden generar cataratas.

No es habitual la intoxicación por este metal debido a que es de muy difícil absorción por el organismo, pero en caso de producirse, la entrada al organismo vivo suele ser debida a un accidente y generalmente por ingestión, o debida a las tareas profesionales desempeñadas (enfermedad laboral). En este último caso la vía de entrada más común es la inhalatoria y la tópica.

Para minimizar el riesgo de intoxicación por Cromo, la EPA marca como límite máximo de concentración de este metal en agua para consumo humano el valor de 100 µg/l. También existen límites para la presencia de Cromo en el aire, siendo éstos muy variables en función de la forma de presentación del Cromo en el medio.

### En el ser humano:

Ha habido casos de intoxicación por cromo debido a la ingesta de alimentos enlatados en envases de metales con cromo en su composición, aunque estos casos ya no son frecuentes en la actualidad.

Es frecuente la intoxicación por Cromo en los empleados de las industrias textil y del acero, aunque tampoco es raro en industrias cementeras, de fabricación de vidrios y explosivos, procesado de muebles y limpieza de metales, pudiendo darse casos de intoxicaciones graves en estas industrias. También los fumadores habituales de tabaco pueden presentar concentraciones algo superiores a los valores normales en sus tejidos.

El contacto ocasional con la piel puede provocar cuadros alérgicos y erupciones cutáneas, enrojecimiento e hinchazón de la superficie de la piel.



**Figura 5.1.- Úlcera por contacto dérmico con Cromo en la preparación de cemento. Fuente: [www.viasalus.com](http://www.viasalus.com)**

Una vez dentro del organismo, se acumula en la piel, pulmones, músculos y grasas en concentraciones normales. Cuando la concentración aumenta, se detecta también en el hígado, bazo, espina dorsal, cabellos y uñas. La eliminación de este metal se realiza por vía urinaria hasta en un 80% y el resto en heces y leche materna, cabello y uñas. Es por esto por lo que los análisis para la determinación de intoxicación por cromo analizan la presencia de éste en cabello, orina y sangre.

La intoxicación aguda, poco frecuente, provoca daño gastrointestinal, insuficiencia hepato-renal, lesiones nasales y cutáneas, problemas de insuficiencia respiratoria y disfunciones en el sistema inmunológico. Por el contrario, la intoxicación crónica, mucho más frecuente, provoca en general problemas de alteración en el material genético celular y , en casos extremos, llegar a provocar la muerte. Además:

- Por ingestión: Hepatitis crónicas tóxicas, molestias estomacales, convulsiones, úlceras y nefritis, erosión y amarilleo de los dientes.
- Por vía cutánea: Llagas en las piernas, dedos y uñas.
- Por inhalación: Laringitis, bronquitis, lesiones del tabique nasal como hemorragias y perforación del tabique, y en casos de exposición muy prolongada puede aparecer cáncer de pulmón y fibrosis pulmonar.

En los ecosistemas:

El Cromo suele estar presente en los alrededores de zonas con intensa actividad minera, vertederos industriales y lodos residuales de depuradora y presenta, para los ecosistemas, la problemática particular de ser bioacumulable.

Este metal se presenta en el medio natural en dos niveles de oxidación distintos:

- $\text{Cr}^{+3}$ : Resulta tóxico para los peces, apareciendo problemas en las agallas y en general provoca problemas respiratorios en los animales.
- $\text{Cr}^{+6}$ : Tóxico para las bacterias, los vegetales y cancerígeno para los animales superiores, habiéndose detectado casos de carcinogénesis. Además, esta forma de oxidación del cromo es muy móvil y puede encontrarse a considerables distancias de su foco de emisión.

En general, los fenómenos de acidificación del medio natural facilitan la absorción de Cromo por las plantas lo que facilita la posibilidad de aparición de este metal en la pirámide trófica de los ecosistemas.

Por último, los sistemas de eliminación y descontaminación de efluentes con Cromo en el sector industrial actualmente están basados en la acción adsorbente de arcillas como la illita, la montmorillonita, la bentonita y la caolinita. Siendo la opción de la descontaminación por procedimientos térmicos todavía muy poco utilizada.

### **Contaminación por Níquel:**

Las fuentes naturales y antropogénicas de contaminación por este metal son:

- Fuentes naturales: minerales como la Laterita y la Pentlandita ((NiFe)<sub>9</sub>S<sub>8</sub>) y meteoritos la mayoría de los cuales contienen porcentajes entre el 5 y el 50% en peso de este metal.
- Fuentes antropogénicas: Minas, fabricación de acero austenítico, fabricación de aleaciones de Níquel, monedas, baterías recargables, componentes informáticos, cintas procesos industriales con catalizadores de Níquel, recubrimientos metálicos, fundición y soldaduras.

Ecotoxicológicamente, la mayor parte del Níquel que de forma natural o antropogénica se libera al medio natural acabará siendo retenido por los sedimentos y el suelo, en los que, en función del pH, será más o menos biodisponible.

#### Afecciones a las plantas:

La presencia de Níquel en los suelos provoca efectos negativos en las plantas que en ellos viven. Las plantas absorben el Níquel con facilidad por sus raíces y de esta absorción y posterior acumulación en las células, aparecen daños en hojas y tallos por intoxicación con este metal. También se ha observado una disminución en la tasa de crecimiento de las plantas debido a la presencia de este metal a escala celular (Tenorio, 1988).

En las aguas continentales, la presencia de iones de Níquel disueltos provoca la disminución de las tasas de crecimiento de algas y plantas acuáticas, aunque se ha detectado que, a concentraciones bajas de Níquel en las aguas, las plantas acuáticas y algas son capaces de desarrollar cierta resistencia a este tipo de contaminación.

Afecciones a los animales y el ser humano:

El Níquel representa una amenaza para la vida acuática continental si supera la concentración de 56 µg/l, siendo este límite de 7 µg/l si se trata de la vida en zonas costeras marinas.(USEPA)

La intoxicación leve por Níquel supone frecuentemente, para el ser humano, la aparición de cuadros clínicos típicos de reacciones alérgicas como dermatitis, asma alérgico e irritación de las vías respiratorias, en función de la vía de entrada del tóxico al organismo. En casos de intoxicaciones agudas, casos poco frecuentes, los cuadros clínicos se agravan.

La intoxicación por ingesta es muy rara en los seres humanos ya que tan sólo pasa al interior del cuerpo el 3%-6% del total de Níquel que se ingiere.

Las intoxicaciones crónicas por Níquel ocurren normalmente en el ámbito laboral debidos a una inadecuada protección del trabajador frente a la presencia de Níquel en forma de Carbonilo ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ) en polvo en el aire o por contacto directo de este metal con la piel. En estos casos los efectos son de tipo carcinogénico, apareciendo el cáncer de piel y de pulmón como consecuencia de estas intoxicaciones crónicas. Los periodos de tiempo de aparición de síntomas en estas intoxicaciones son largos.

En los mamíferos, aunque muy raramente, también pueden ocurrir intoxicaciones crónicas por Níquel, presentándose cuadros sintomáticos similares a los del ser humano, con especial incidencia de los procesos carcinogénicos en piel y vías respiratorias.

**Contaminación por Cobre:**

El Cobre puede localizarse, tanto de manera natural como antropogénica en el planeta. Algunas de sus fuentes más importantes son:

- Fuentes naturales: El Cobre puede encontrarse de forma natural en compuestos minerales sulfurados y metamórficos como la cuprita y

la tenorita y en sales muy poco solubles como la malaquita y la atacamita. También puede presentarse en forma metálica como Cobre nativo, aunque es su forma de aparición menos frecuente.

- Fuentes antropogénicas: En general aparece en toda actividad humana relacionada con la electricidad y el transporte de la misma, la instalación de tuberías de abastecimiento y en la industria de los pigmentos para vidrios. También aparece como residuo en las industrias galvánicas. Fue intensamente extraído durante el S.XIX en las minas de Río Tinto (Huelva), constituyéndose éste como el principal aprovechamiento minero de Cobre de la Península Ibérica.

El Cobre es esencial para el correcto funcionamiento de los organismos vivos y, en el caso particular del ser humano, es fundamental para la síntesis de la hemoglobina y el eficaz transporte del oxígeno desde los alvéolos pulmonares hasta las células. Este metal ayuda a proteger a los organismos vivos de la intoxicación por monóxido de carbono.

#### Afecciones a las plantas:

El Cobre no es uno de los metales más peligrosos para la vida vegetal. No obstante, dependiendo de la capacidad de absorción de iones desde el suelo a las raíces de cada especie, pueden aparecer fenómenos de intoxicación por Cobre.

Normalmente se considera que existe riesgo de contaminación para la vida vegetal si se detectan concentraciones superiores a las 50 ppm en el suelo, sedimentos o en las aguas de riego. A partir de estos niveles, la presencia de oxígeno, la acidez del medio en el que se encuentre el Cobre, así como la posibilidad de presentarse en forma combinada con compuestos orgánicos, determinará el potencial intoxicador del metal y la intensidad de sus efectos.

#### Afecciones a animales y ser humano:

Como se ha afirmado con anterioridad, el Cobre es un oligoelemento necesario para el correcto desarrollo de la vida. Así, se sabe que para el ser humano es imprescindible su ingesta en cantidad de 2 mg/día.

Toxicológicamente, este metal es bioacumulable en el organismo y se absorbe en un 30% del total de ingesta diaria. Los depósitos preferentes del Cobre son el hígado, el tejido muscular, el corazón y el cerebro.

Para los organismos inferiores, las sales de Cobre son muy tóxicas y suelen emplearse con frecuencia para combatir la aparición de algas y bacterias en las aguas.

Para la conservación de la vida animal acuática, la USEPA establece unos niveles máximos de concentración de este metal en el agua. Estos niveles son 6,5 µg/l para la vida acuática en agua dulce y 2,9 µg/l para la vida en estuarios marinos y zonas costeras.

Para los animales terrestres, el consumo de alimentos contaminados con Cobre o la ingesta de agua contaminada puede provocar, generalmente a medio y largo plazo, problemas serios como alteraciones del sistema digestivo, lesiones hepáticas y mortandad prematura.

Por otra parte, la presencia de iones de Cobre disueltos en agua potable no debe superar en ningún caso el nivel de 1,5 ppm (la USEPA ha establecido ya un nivel máximo permisible de 1 ppm en aguas de consumo), ya que en este caso la concentración de este metal en el ser humano puede desencadenar cuadros tóxicos como vómitos, malestar, cirrosis y, en casos de intoxicaciones graves, anemias, hemocromatosis y lesiones en el sistema nervioso central de muy difícil reversibilidad (Tenorio, 1988).

### **Intoxicación por Zinc:**

El Zinc puede encontrarse en la corteza terrestre como resultado de su movilización desde distintas fuentes que pueden ser clasificadas en:

- Fuentes naturales: El Zinc está presente en minerales como la Calamina ( $Zn_4(OH)_2 \cdot Si_2O_7 \cdot H_2O$ ), la Willemita ( $Zn_2SiO_4$ ), la Cincita ( $ZnO$ ) y la

Esfalerita (ZnS) Biológicamente está presente en numerosas enzimas y es un oligoelemento esencial para la vida.

- Fuentes antropogénicas: Como residuo en industrias galvánicas, soldaduras, equipos eléctricos, fabricación del caucho, del latón y del bronce, agentes blanqueadores, etc. Es usado en la industria del cuero, la industria textil y en elaboración de diversos pigmentos.

Desde un punto de vista biológico, el Zinc es un oligoelemento fundamental para el desarrollo de la vida tal como se conoce en la actualidad. El Zinc forma parte de una ingente cantidad de proteínas y enzimas además de participar de forma indispensable del complejo metabolismo celular: Su ausencia resulta tan nefasta como su exceso. También interviene de manera decisiva en el transporte del dióxido de carbono desde las células a los alvéolos pulmonares.

#### Afecciones a las plantas.

El Níquel no es un metal excesivamente tóxico para la vida vegetal, necesitándose concentraciones muy importantes de este metal en agua y suelos para que se observen síntomas de intoxicación en las plantas. No obstante, se sabe que la absorción de Zinc por las raíces, y por tanto su potencial intoxicación, depende de las condiciones del suelo, la capacidad de intercambio catiónico y el pH principalmente (Tenorio, 1988).

#### Afecciones a los animales y al ser humano.

Las vías de entrada del Zinc al organismo son las tradicionales: ingesta, respiración y por contacto dérmico, siendo la vía ingesta considerablemente peligrosa debido a la facilidad con la que el organismo absorbe el Zinc en el aparato digestivo: entre un 20 y un 30% del total ingerido queda retenido en el organismo. El resto es excretado.

El transporte se realiza junto con proteínas segregadas por el páncreas y su acumulación biológica es especialmente intensa en el hígado, páncreas, riñones y, en el caso de los varones, también la próstata.

Pese al potencial de absorción que presenta vía ingesta, este metal no resulta especialmente tóxico y son necesarias dosis muy elevadas para observarse cuadros clínicos de intoxicación por Zinc.

En el caso de los mamíferos, no se observan síntomas de intoxicación con concentraciones por debajo de 1000 ppm de este metal en el alimento diario (Tenorio, 1988).

Según la USEPA, los niveles de Zinc en agua no deben exceder en ningún caso los 180  $\mu\text{g/l}$  en aguas continentales y 76  $\mu\text{g/l}$  en aguas de estuarios y zonas costeras marítimas. El nivel máximo admisible por este organismo para las aguas de consumo humano es de 5  $\mu\text{g/l}$ .

### **Contaminación por electrolitos gastados de la industria galvánica:**

La contaminación ambiental generada por los vertidos de los baños electrolíticos gastados y las aguas de lavado en las industrias galvánicas, es muy importante. Los baños electrolíticos más usuales son los que contienen los metales anteriormente descritos en su composición y por lo tanto, su vertido al medio natural provocará las afecciones anteriormente descritas. No obstante, la presencia de otros tóxicos no estrictamente metálicos que se combinan con éstos en su afección al entorno, hace que la problemática ambiental de los baños electrolíticos presente un abanico más amplio.

Los electrolitos de Cobre, Níquel, Cromo y Zinc, además de otros compuestos con otros metales, contienen un potencial contaminante muy considerable debido a la presencia de determinados productos tóxicos en su composición. Así, estos efluentes presentan la problemática de ser tremendamente tóxicos (pues poseen cianuro en su composición) muy corrosivos y eliminarse a una elevada temperatura, lo que, además de acelerar los procesos biológicos, supone también una alteración ambiental en sí misma.

Por último, estos electrolitos contienen también sulfatos, pirofosfatos, fluoroboratos, ácidos varios, amonio, cloruros y otros compuestos químicos que deben ser considerados en los procesos de recuperación o eliminación de los mismos.

### **Contaminación por efluentes líquidos de la industria cerámica:**

Uno de los principales problemas de la industria cerámica es la fuerte carga contaminante de sus efluentes. Estas aguas presentan, desde el punto de vista de la contaminación por metales, principalmente Plomo y Zinc en su composición, tanto en forma disuelta como particulada. Este hecho hace que los efectos que esta agua pueden generar en el entorno sea grave, viéndose afectados los suelos, plantas y animales en los ecosistemas naturales y, en último término, el ser humano.

No es sencilla la eliminación de estas materias los efluentes que las contienen. De hecho, la industria cerámica actual ha de afrontar el tratamiento adecuado a las aguas residuales que produce, ya que éstas presentan turbidez y color, viniendo caracterizadas en detalle desde el punto de vista de la carga contaminante que contienen por:

- Sólidos en suspensión: Son mayoritariamente arcillas, restos de las fritas y silicatos insolubles.
- Iones disueltos: Se ha identificado la presencia de sulfatos, cloruros y fluoruros en las aguas residuales de la industria cerámica.
- Metales pesados: Pueden aparecer tanto en disolución como suspendidos. Estos metales son generalmente Plomo y Zinc y presentan una problemática toxicológica muy considerable en la naturaleza
- Otros compuestos: Es frecuente la presencia de Boro, restos de serigrafía, colas y residuos del esmaltado en las aguas residuales de este tipo de industrias.
- Aguas a elevadas temperaturas: Procedentes de procesos de intercambio de calor y de fabricación, las industrias cerámicas producen en torno a 800-2000 l/m<sup>2</sup> producido. El grueso de esta agua caliente se genera en los intercambiadores de calor.

Actualmente la tendencia en la valorización de los residuos de la industria cerámica es la de aproximarse al vertido cero, reciclando el agua residual previo tratamiento descontaminador y extrayendo de ella los contaminantes que son eliminados en forma seca.



### III.- SISTEMAS DE RECUPERACIÓN DE METALES PESADOS DE EFLUENTES RESIDUALES

---

6. Generalidades	31
7. Procesos térmicos	37
8. Procesos no térmicos	45



## 6.- Generalidades

---

Una de las formas que históricamente más se ha empleado para la eliminación o separación de componentes disueltos en agua es el de la destilación. Su utilización ha sido muy extensa en sectores como el farmacéutico, el químico, los perfumes y muchos otros.

En esencia, la destilación consiste en la separación de dos o más líquidos que se encuentran mezclados o de un soluto y su disolvente, mediante la aplicación de la energía suficiente para provocar la ebullición. Con esta ebullición, los componentes más volátiles de dicha mezcla pasan a estado gaseoso y pueden ser posteriormente condensados a parte de la mezcla inicial.

Las primeras referencias históricas del proceso de destilación que se tienen en la actualidad proceden del Imperio Egipcio. Por lo que se ha podido saber, parece que en determinadas zonas donde el agua escaseaba, se hervía agua de mar en un caldero y se aprovechaban las gotas que se formaban en la tapadera para su uso como bebida. También se sabe que destilaban aceites minerales a partir del alquitrán, y mercurio a partir del cinabrio (Valiente-Barderas, A. 1995).

El aparato que históricamente se ha utilizado para realizar la destilación ha sido el alambique, palabra que procede del árabe *al anbiq*, y está compuesto de tres partes: La primera parte es un calderín en el que se calienta el compuesto inicial, la segunda parte es un conducto frío o refrigerado donde se provoca la condensación de la fracción destilada y la tercera parte es un recipiente para la recogida del destilado.

Los primeros usos de la destilación fueron de tipo alquímico, es decir, se usó para intentar conseguir transformar elementos químicos en otros más valiosos, como por ejemplo colorantes o metales, pero esta aplicación, si bien la más antigua, carecía de base científica. Algo después de los primeros experimentos de alquimia con los alambiques, éstos y la destilación se empezaron a emplear en la separación de

compuestos químicos líquidos disueltos en agua o en otros disolventes e incluso se los cita en algunas recetas.

El mundo de la destilación se vio revolucionado por Abu Mussah-al-Sofi, que en el año 760 dC describe algunos de los métodos empleados en aquella época para la evaporación y otras técnicas de separación como la filtración o la sublimación. Sus descripciones suponen un salto importante respecto a lo que se conocía de estos procesos con anterioridad. En esta época se producen importantes cambios en los aparatos y procesos de separación como la mejora y el cambio de los materiales con los que se fabricaban los aparatos, la mejora en la calidad del vidrio, etc.

En el año 1085 se tiene constancia de la destilación y almacenamiento de gasolina en El Cairo. En este año hubo un incendio en el que ardieron los depósitos de esta sustancia en la ciudad. El hecho de que hubiera grandes depósitos supone que debían existir técnicas depuradas y aplicadas a gran escala como hornos de galería, materiales refractarios y refrigeradores de gran eficiencia.

La mejora en las técnicas de destilación afectó favorablemente a los procesos de fabricación de perfumes, alcoholes y a muchos otros procesos. La destilación del agua de rosas mediante arrastre con vapor fue uno de los procesos que más impacto produjeron en el mundo conocido durante el siglo IX.

En Europa, durante el oscuro periodo cultural que supuso la Edad Media, triunfó en los países cristianos la práctica de la Alquimia árabe con el fin de transformar en oro otros materiales comunes. Aunque también en este periodo se comienza a destilar alcohol, ácido nítrico y otros productos, eso sí, de forma muy localizada y puntual en los grandes centros de conocimiento que fueron los monasterios y algunos centros estudiantiles de las grandes ciudades europeas.

Posteriormente, ya pasada la Edad Media, el refrigerador evolucionó a un serpentín alrededor de un tubo por el que pasaba el vapor a condensar y con esto, fue posible una destilación más precisa que permitió recuperar líquidos de bajo punto de ebullición y

producir alcohol 96% a gran escala. Con ello aparecen en escena los licores de alta graduación como ginebra y aguardiente.

La posibilidad de generar alcohol y ácidos a gran escala de manera sencilla revoluciona el mundo de la química y se estudian las propiedades de ácidos, bases, disolventes orgánicos y muchos otros compuestos.

Pero en general, no aparecen más usos ni aprovechamientos de la destilación hasta el inicio de la Revolución Industrial. En esta época, tras los descubrimientos de Rumford, que empleó por primera vez el vapor de agua para transmitir calor a otros cuerpos en el año 1800, se descubre que por destilación puede obtenerse gas inflamable a partir del carbón y también benceno a partir del alquitrán. En 1856 se instalan las primeras plantas de destilación de alquitrán de Hulla.

El desarrollo de la destilación en el siglo XIX supone la aparición de las primeras columnas de rectificación de funcionamiento continuo y con ellas el descubrimiento de compuestos volátiles como el benceno, tolueno o xileno a partir de la destilación de Alquitrán.

A finales del siglo XIX, la mejora en la calidad del vidrio, que supuso una mayor resistencia del mismo al calentamiento y enfriamiento continuado, mayor transparencia y ductilidad, facilitó su aplicación en la construcción de refrigeradores, tubos y matraces similares a los empleados hoy en día. Gracias a esta utilización y mejora, la destilación ha ido evolucionando hasta nuestros días revelándose como una indispensable metodología de separación así como una técnica muy valiosa para la analítica química.

También a finales del siglo XIX aparecen las primeras columnas de rectificación, fabricadas en principio con metal y posteriormente con elementos de vidrio, y que constaban de un calderín, una serie de platos dispuestos en columna y un condensador en el que se condensan los vapores salientes de la columna. Parte de este producto se recirculaba y el resto se extraía como producto.

En esta época, una de las industrias que vive un auge importante es la de refinado del petróleo. Hasta este momento, tan sólo se producía queroseno a partir de las extracciones de petróleo existentes pero con la mejora de las técnicas de destilación y separación por evaporación, la refinación del petróleo y la obtención de nuevos productos a partir del mismo aumentaron considerablemente. Por destilación se obtenían lubricantes, parafinas, asfalto, combustibles varios y sobre todo, destacando entre ellos, la gasolina. La fabricación de estos combustibles ha ido en aumento año tras año hasta nuestros días, destinados principalmente a la alimentación de motores de automóviles y aviones, calefacción, industrias, etc.

En 1893 y 1899, Hausbram y Sorel respectivamente presentaron los primeros estudios de orden matemático dedicados al diseño de las columnas de fraccionamiento, presentando relaciones matemáticas relativas a la separación de mezclas de alcohol y agua e introdujeron por primera vez conceptos termodinámicos tan conocidos actualmente como entalpía molar, pérdida de calor, etc.

Ya en el siglo XX, diversos investigadores presentaron mejoras a los métodos primitivos que permitieron un mejor y más rápido cálculo de los destiladores, así como el número de platos teóricos necesarios para una columna de rectificación. Estos avances fueron el paso previo a la aparición de nuevos sistemas como el Cracking (1936).

A mediados de dicho siglo, comienza el estudio de la separación por destilación de mezclas multicomponentes así como el perfeccionamiento de la separación de mezclas azeótropas. Este estudio recibe un especial impulso cuando, en 1988 se logra, mediante el uso de computadoras, aplicar las ecuaciones de estado al cálculo del equilibrio vapor-líquido. Con los conocimientos adquiridos por este y otros estudios e investigaciones se mejora el diseño de las columnas permitiéndose entonces la obtención de productos prácticamente puros mediante destilación, rectificación y fraccionamiento.

En las últimas décadas, las aplicaciones de la evaporación se han multiplicado, apareciendo ésta como tecnología apta para tratamientos de aguas, recuperación de solutos y purificación de líquidos entre otras. El auge y diversificación de la industria y

sus avances tecnológicos en la segunda mitad del S.XX han supuesto también un aumento y diversificación de sus residuos, muchos de los cuales, eliminados en forma líquida encuentran un tratamiento y valorización adecuados en la evaporación y los procedimientos térmicos en general.

Hoy en día, la destilación y sus técnicas de separación derivadas son sistemas plenamente vigentes y utilizados tanto a nivel industrial (ver Anexo III) como investigador, aunque existen otras técnicas de separación que se prefieren en algunos usos concretos. Algunas de estas nuevas técnicas son la extracción líquido – líquido, las tecnologías de membranas y la adsorción.

De cualquier manera, aunque hayan aparecido nuevas técnicas de separación, la destilación y sus técnicas derivadas siguen estando plenamente vigentes tanto en cuanto a su utilización general como a su investigación y desarrollo. Aún no se ha dicho la última palabra respecto a la destilación y prueba de ello es la continua publicación de artículos de investigación relativos a este procedimiento de separación que siguen apareciendo aún hoy en día en revistas de alto impacto (Desalination, Experimental Thermal and Fluid Science, International Journal of Heat and Mass Transfer, International Journal Mineral Processing, Water International, Applied Thermal Engineering, Tecnología del Agua., Nuclear Engineering and Design, et al.).



## 7.- Procesos térmicos

---

La evaporación es un proceso unitario que consiste en la separación de un solvente volátil de un soluto no volátil por cambio de estado del primero, de líquido a gas.

La separación por evaporación se ha utilizado de manera muy extensa a lo largo del tiempo y ha evolucionado en distintas técnicas que tienen características particulares así como usos más recomendados.

Para lograr este cambio de estado que permita la separación del soluto y el solvente, debe suministrarse calor a la mezcla. El calor puede ser suministrado de varias maneras; de forma directa mediante calentamiento de un recipiente que contiene la muestra o de forma indirecta por medio del empleo de vapor de agua como agente transmisor de calor. En este modo de transmisión de calor, se emplea una caldera donde se calienta el agua hasta que se evapora y el vapor se conduce hasta el lugar donde transmitirá ese calor a la mezcla que se desea separar. Esta forma de transmisión del calor se basa en el concepto de *calor latente de evaporación* para transmitir grandes cantidades de calor en el lugar donde el vapor de agua usado para calentar la mezcla cambia de estado y pasa a ser un líquido.

El calor transmitido por cada gramo de vapor de agua que pasa a estado líquido es de 536 cal. Este valor es el que se conoce como calor latente de evaporación del agua.

Por otra parte, para facilitar la evaporación del disolvente se pueden emplear sistemas generadores de vacío, de modo que se someta a la mezcla que se desea separar a presiones inferiores a la atmosférica. Con ello, se logra disminuir la temperatura de ebullición de los líquidos y también aumentar la eficiencia del fenómeno de transferencia de calor en el sistema. Para el caso del agua destilada, las presiones inferiores a la atmosférica afectan a la temperatura de ebullición en la forma que muestra la tabla 7.1 (adaptada de García Garrido, J. 1986).

Tabla 7.1.- Presión de vapor para el agua pura expresada en mm Hg

Temp °C	Presión mmHg	Temp °C	Presión mmHg	Temp °C	Presión mmHg
1	4,92	35	42,17	70	233,70
4	6,54	40	55,32	76	301,40
10	9,20	45	71,88	80	355,10
15	12,78	50	92,51	86	450,90
20	17,53	55	118,04	90	525,76
25	23,75	60	149,38	95	633,90
30	31,82	66	196,09	100	760

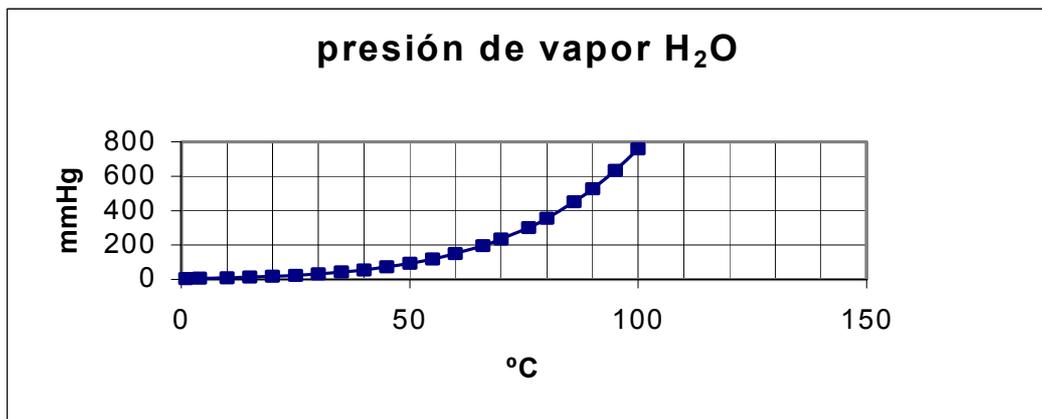


Figura 7.1.- Representación gráfica de la evolución de la presión de vapor para el agua pura en mm Hg. Adaptada de García Garrido, J. 1986.

### 7.1.- Consideraciones previas

Al plantear la utilización de un proceso térmico de separación para su aplicación sobre una mezcla líquida concreta, deben considerarse los siguientes puntos:

- La termosensibilidad de la disolución
- La potencial corrosión a los materiales
- La concentración y otras características físicas
- La potencial aparición de incrustaciones

Respecto a la termosensibilidad de la disolución alimento es destacable la importancia que tiene trabajar a baja temperatura en aquellos casos en los que las propiedades de dicha disolución puedan verse alteradas con la temperatura. Esto es muy frecuente en los elementos proteínicos, que pueden desnaturalizarse con el aumento de temperatura. La separación por volatilización del disolvente para concentrar el soluto permite la aplicación de vacío para disminuir así la temperatura de volatilización del disolvente y eliminar el riesgo de alteración de las propiedades de la disolución alimento.

La corrosión de los materiales que conforman el evaporador puede aparecer si el líquido alimento es considerablemente agresivo respecto a los materiales en los que se ha construido el evaporador. En la actualidad todos los evaporadores se construyen ya con acero inoxidable, grafito, níquel, cobre y algunas aleaciones de especial resistencia a la corrosión, por lo que el espectro de disoluciones potencialmente tratables por separación térmica es muy amplia.

A concentraciones de soluto muy elevadas, las diluciones pueden ver alteradas sus características físicas de manera considerable. La conductividad, el punto de ebullición, la viscosidad, son algunas de estas propiedades.

Como resultado de la volatilización del disolvente, la concentración de diluciones puede ocasionar la aparición de incrustaciones provocadas por la cristalización del soluto en las paredes del evaporador. Esto puede provocar una disminución de la eficiencia en el funcionamiento del evaporador. Es por lo tanto importante un buen mantenimiento de las partes en las que este fenómeno pueda aparecer.

## **7.2.- Clasificación de los evaporadores tubulares**

La evaporación mediante sistemas de intercambio térmico realizada sobre evaporadores de tipo tubular puede llevarse a cabo en modelos de evaporación con muy distintas configuraciones (Levenspiel, O. 1993; Perry, R.H. 2001; Costa, E. 1986):

- Evaporadores de tubos horizontales
- Evaporadores de tubos verticales
  - De película descendente
  - De película ascendente
- Evaporadores de conducción forzada

Los evaporadores de tubos horizontales funcionan básicamente por arrastre del vapor producido junto al concentrado que se genera en los tubos intercambiadores de calor y posteriormente separado de éste a la salida del sistema evaporador. De manera generalista, este tipo de evaporadores que presenta una variabilidad en lo referente a sus dimensiones, tiene un formato de los denominados de “carcasa y tubos” con diámetros exteriores de carcasa que oscilan entre 1 y 3,5 m, mientras que en su interior contienen un elevado número de finos tubos de diámetros entre 1,5 y 3 cm. Por los tubos finos se hace circular vapor que transmite calor al sistema y por el interior de la carcasa se dispone el líquido alimento a tratar.

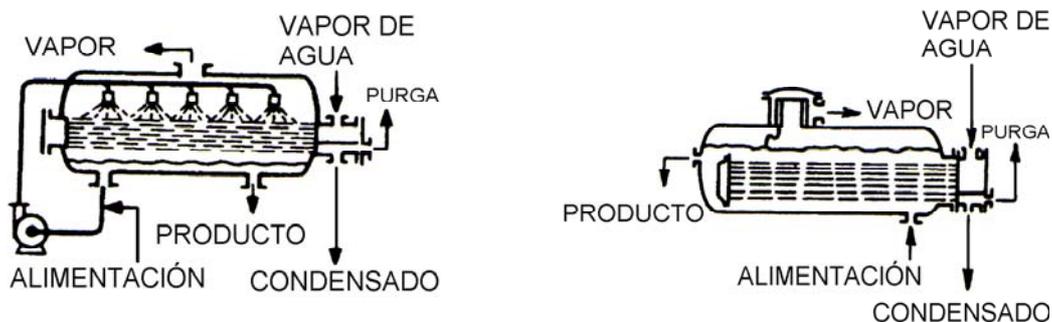


Figura 7.2.- Croquis de evaporadores de tubos horizontales. Perry, R.H. et al. 2001

Por otra parte, los evaporadores de tubos verticales se diferencian de los anteriores en su disposición, que en estos casos no es horizontal sino vertical y también en su filosofía de funcionamiento. En este tipo de evaporadores el líquido alimento fluye por el interior de los tubos finos y el vapor transmite el calor por contacto con el exterior de éstos.

Normalmente presentan una configuración del tipo “carcasa y tubos” aunque en algunos casos pueden ser mono tubulares. Las dimensiones de los evaporadores verticales de tipo industrial oscilan entre los 2,5 y 5 cm de diámetro interior de los tubos verticales

con una longitud de los mismos de entre 2 y 10 metros. Las dimensiones de las carcassas se ajustarán al número de tubos, diámetro y longitud de los mismos, siendo éstas muy variables, así como los materiales de que se construyen. Este tipo de evaporadores se diseña para su funcionamiento a contracorriente ya que ésta es, sobre el papel, la forma más eficiente de funcionamiento.

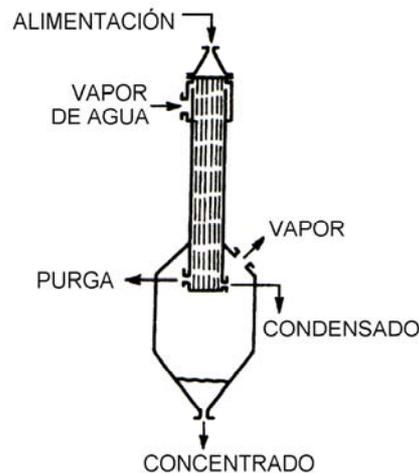


Figura 7.3.- Croquis de un evaporador vertical. Perry, R.H. et al. 2001

Los evaporadores de flujo ascendente funcionan introduciendo la disolución a concentrar en los tubos por la parte inferior y provocar por intercambio térmico la volatilización del disolvente en el interior de éstos, de manera que ascienda en forma de burbujas hacia el extremo superior donde el vapor es recogido y condensado a parte. El concentrado así obtenido se recircula o se extrae del evaporador.

Los evaporadores de flujo descendente funcionan, por el contrario, con la introducción de la disolución por la parte superior de los tubos y el descenso por arrastre del vapor generado por la volatilización del soluto, siendo éste recogido a la salida del aparato de evaporación.

Por último, los evaporadores de circulación forzada funcionan mediante la realización de una presión con una bomba que obliga a la disolución alimento a desplazarse por el interior del intercambiador de calor a la velocidad deseada. En el intercambiador se genera la evaporación del disolvente y la concentración del soluto. En esencia el

comportamiento no es diferente del de los evaporadores de circulación no forzada. La principal ventaja de este tipo de evaporadores es su aptitud para tratar líquidos considerablemente viscosos, ya que la presión ejercida para el desplazamiento del líquido alimento en este tipo de evaporador lo permite y esto es algo que no se da en los casos anteriormente descritos. Con esto se mejora la transmisión calorífica y por ello también la eficiencia de los evaporadores en las condiciones anteriormente citadas.

### **7.3.- Configuración de los evaporadores tubulares**

En el ámbito industrial, los evaporadores se configuran para su funcionamiento en dos o más etapas, de manera que el líquido o vapor de calefacción pueda ser empleado más de una vez (Pitts, D.R. et al. 1981). A escala de laboratorio, por el contrario, es habitual el trabajo en una única etapa.

En muchos casos, se aprovecha el vapor generado en el proceso de destilación del alimento para calentar y servir de elemento de transmisión de calor en otro proceso de volatilización. Así se consigue aumentar la eficiencia energética de los procesos evaporadores, así como su economía, siendo éste uno de los principales objetivos de todo aprovechamiento industrial. Esta filosofía de funcionamiento ha evolucionado hasta derivar en los procesos MSF (MultiStage Flash) y MED (MultiEffect Distillation) (Kern, D. 1990) que se detallarán más adelante.

Por otra parte, un único evaporador tubular puede ser configurado de diversas formas. Algunas de las opciones más usuales son:

- De un solo paso
- De varios pasos
- De recirculación

Los evaporadores de carcasa y tubos de un único paso consisten en una serie de tubos que atraviesan la carcasa una única vez de manera que el líquido a evaporar sólo pasa una vez por el intercambiador e inmediatamente es extraído del sistema.

Los evaporadores de carcasa y tubos de varios pasos consisten esencialmente en la misma filosofía de funcionamiento que el caso anterior pero con la particularidad de que los tubos que transportan el líquido a evaporar pasan dos o más veces por el interior de la carcasa en la que se encuentra el líquido o vapor transmisor del calor. Esto permite aumentar la eficiencia de la transmisión térmica por tubo así como mejora la modulabilidad de configuración del evaporador en su conjunto para una aplicación concreta.

Los evaporadores de recirculación permiten la mezcla del líquido concentrado, por haber pasado ya por el sistema de tubos del intercambiador, con el líquido alimento todavía por evaporar. Esto permite una mayor concentración del líquido que queda en el interior del intercambiador y es interesante si lo que se persigue es la obtención de un concentrado con alta carga de soluto.

Por último, la elección del tipo de evaporador tubular así como las características del mismo deberá ajustarse a las necesidades del proceso al que se vaya a dedicar, así como a las propiedades del líquido a tratar y las exigencias de los productos que de esta operación se quieran obtener. Con ello se podrá optimizar el rendimiento energético del evaporador así como su economía para una mejor aplicación industrial de estos procesos.



## 8.- Procesos no térmicos

---

Además de los procesos térmicos o evaporativos anteriormente descritos, existen también otros métodos utilizados en la separación y recuperación de aguas contaminadas, entre los que destacan los procesos de membranas.

### 8.1.- Procesos de membrana

---

Los procesos de membranas son procesos de difusión física de partículas en el agua. Están basados en el aprovechamiento de determinadas clases de membranas que permiten el paso a través de ellas de partículas con unas características particulares (tamaño, carga eléctrica...), mientras que impide el paso de aquellas que no las poseen.

La utilización de membranas para la depuración de agua se puede clasificar en dos grandes grupos en función a la técnica aplicada. El primer grupo es el de la depuración por electrodiálisis y el segundo grupo es el que comprende los procedimientos de ósmosis inversa. La utilización de las membranas en estos dos casos es completamente diferente, aunque en ambos se emplean las propiedades específicas del tipo de membrana utilizada para separar distintos tipos de partículas disueltas en el agua.

Actualmente existen muy diversas clases de membranas, que permiten el paso de unos solutos u otros en función de su naturaleza, carga iónica o tamaño. Los procesos de separación por membrana pueden clasificarse según:

- Electrodiálisis. (ED)
- Electrodiálisis Reversible. (EDR)
- Ósmosis inversa. (OI)

### 8.1.1.- Electrodialisis. (ED)

Este método de separación comenzó a explotarse comercialmente en la década de los 60 y está basada en las propiedades electrolíticas de los iones de sales que en su mayoría están cargados eléctricamente con cargas positivas (cationes) o negativas (aniones). La electrodiálisis consiste en la eliminación de estos iones cargados eléctricamente y que se encuentran disueltos en el agua. Para llevar a cabo esta eliminación se introduce en el agua alimento un par de electrodos de distinta carga eléctrica de manera que los iones disueltos serán atraídos por los electrodos de distinto signo al suyo propio. Por este procedimiento se logra desplazar los iones de un lugar a otro de la disolución. Si, además, se hacen servir juegos de membranas selectivas al paso de estos iones, se puede concentrar a un lado de las membranas agua con elevada concentración de iones y, a otro lado, agua dulce con muy poca cantidad de iones disueltos.

Es fundamental el empleo de membranas selectivas aniónicas y catiónicas alternativamente para que el agua alimento vaya perdiendo iones negativos y positivos tras su paso por la zona de separación. Entre las membranas se colocan espaciadores que forman canales por los que circula el agua alimento. Lo interesante del método es colocar las membranas de tal modo (alternativamente) que en unos canales se concentren los solutos, en un agua que se denomina concentrado, y en otros canales circule agua alimento que va perdiendo poco a poco sus contaminantes hasta salir del proceso con una concentración de sales bajísima.

La presencia de los electrodos provoca el desplazamiento de los iones hacia el polo correspondientes resultando ser atrapados por las membranas y provocando la aparición de la salmuera nombrada anteriormente y la generación de agua desalada por otro lado (Ibrahim Pereira, J.C. 1999). Los espacios existentes entre cada par de membranas (aniónica una y catiónica la otra) se denominan celdas. La unidad mínima de separación por electrodiálisis la componen un par de celdas. De la primera migran los aniones hacia el cátodo y de la segunda migran los cationes hacia el ánodo. Produciéndose un flujo de concentrado y un flujo de agua depurada.

### 8.1.2.- Electrodiálisis Reversible. (EDR)

Las plantas de separación por electrodiálisis reversible, que comenzaron a explotarse comercialmente desde la década de los 70, se basan en los mismos principios que las plantas de electrodiálisis descritas con anterioridad. La diferencia estriba en que en este caso se alteran periódicamente las polaridades de los electrodos de manera que los flujos de agua cambian temporalmente de sentido, pasando a recibir agua depurada aquellos conductos que transportaban el concentrado y al revés. Esta inversión dura tan sólo unos minutos y sirve para que los iones que anteriormente se concentraban en un extremo de la pila, ahora tiendan a desplazarse hacia el extremo opuesto debido al cambio de polaridad en los electrodos.

Las ventajas de este tipo de aplicaciones respecto a las anteriores son las que se deducen de la eliminación de riesgos de formación de precipitados, incrustaciones y obstrucción de las membranas (Ibrahim Pereira, J.C. 1999). Ya que el cambio periódico del sentido de flujo del agua, colabora en la limpieza de conducciones y membranas y evita la aparición de limos y otros depósitos en la planta. Además, con este procedimiento se puede llegar a reducir en cantidad muy importante el tratamiento químico previo que debe recibir el agua que alimenta el proceso, se obtienen altos porcentajes de conversión lo que implica mucha cantidad de agua depurada y poca cantidad de rechazo muy concentrado.

Esta metodología de depuración se emplea mayoritariamente para obtener agua dulce a partir de agua salobre, siendo poco utilizada para la desalación directa de agua de mar, aunque también tiene aplicaciones muy importantes en procesos industriales de separación.

### 8.1.3.- Ósmosis inversa. (OI)

El procedimiento por el cual, a través de una membrana semipermeable se tienden a igualar los potenciales químicos de dos diluciones situadas una a cada lado de la membrana recibe el nombre de ósmosis.

La separación por ósmosis inversa aprovecha este fenómeno y lo hace funcionar al revés mediante la aplicación de una presión en una de las diluciones. De este manera el flujo de agua que debería igualar las concentraciones a ambos lados de la membrana se invierte, dejando pasar agua desde el lado más concentrado al otro en el que se encuentra la dilución de menor concentración. Para este tipo de depuración no se requiere aporte de calor ni cambios de fase sino tan sólo la energía necesaria para suministrar la presión adecuada al agua alimento (Medina San Juan, J.A. 2000)

El modo de funcionamiento del proceso consiste en el bombeo del agua cargada con iones disueltos a un tanque en el que se le somete a una presión contra una membrana. En el proceso se transfiere agua de un lado a otro de la membrana, quedando los iones en el agua alimento de tal modo que se genera un concentrado en el agua que no ha pasado a través de la membrana y un caudal depurado con el agua que sí ha pasado a través de la membrana.

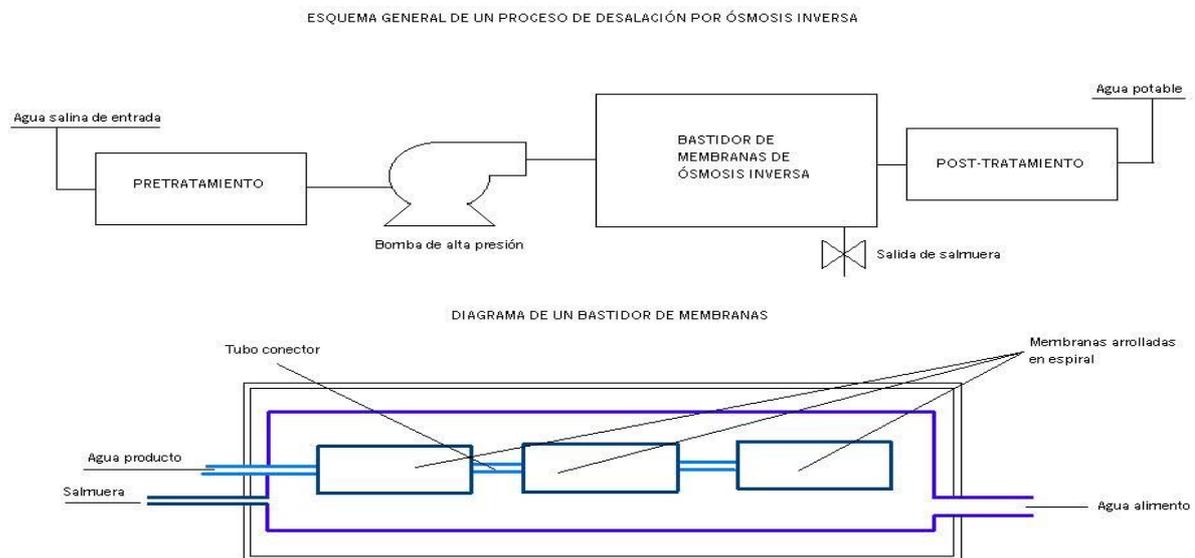


Figura 8.1.3.- Esquema de una planta de osmosis inversa . Adaptada de: seawater desalination in California California Coastal Comission <http://www.coastal.co.gov>

El concentrado que se genera debe ser eliminado del contacto directo con la membrana puesto que de ser así, la concentración de iones continuaría aumentando y se llegaría a un punto en el que se producirían precipitaciones de sales en la superficie de la membrana. Esto debe evitarse porque las precipitaciones salinas obturan las membranas lo que provoca una pérdida de efectividad y un aumento del gasto en mantenimiento y reposición de membranas.

Por norma general, del total de agua alimento tratada, el 20% sale como rechazo y el 80% sale como agua depurada (Medina San Juan, J.A. 2000), aunque estos porcentajes pueden variar mucho en función a la concentración del agua alimento, la recirculación que se realice y el número de celdas de separación que se conecten en serie.

Resulta de especial relevancia en la Ósmosis Inversa la realización de un adecuado pretratamiento ya que el agua a depurar va a estar en contacto con un elemento muy sensible como es la membrana y que se obstruye con facilidad. El pretratamiento tradicional consiste en un filtrado de partículas lo más afinado posible y la adición de agentes que eviten la precipitación de sales en el entorno de la membrana. Generalmente con provocar un descenso del pH hacia valores más ácidos suele ser suficiente para evitar el fenómeno de la precipitación.

Tras el pretratamiento se somete al agua a una presión, que suele oscilar entre las 60 y 70 atm para forzar al agua a pasar a través de la membrana y también para superar la presión osmótica del agua, que se sitúa en torno a 25 atm.

La presión osmótica, la temperatura, el factor de conversión, la calidad del permeado que se desee obtener, las pérdidas de carga y la eficacia de los sistemas de recuperación de la energía son factores que influyen, algunos en gran medida, en el consumo energético de la Ósmosis Inversa. Pero con la utilización de nuevas tecnologías que permiten trabajar a menor presión, nuevos tipos de membranas, mejores bombas y equipos de recuperación de calor eficientes, se consigue reducir el consumo energético hasta en  $1,5 \text{ kWh/m}^3$ , dejando los consumos energéticos medios de este tipo de tecnología en  $1,5 \text{ kWh/m}^3$  para aguas salobres,  $4,5 \text{ kWh/m}^3$  en el caso de agua de mar y

consumos incluso mayores para la depuración de otros líquidos (Medina San Juan, J.A. 2000).

Las membranas que se emplean pueden ser fabricadas de diversos materiales, poliamida por ejemplo, y ser planas, de arrollamiento en espiral o de fibra hueca. Las membranas de arrollamiento en espiral y las de fibra hueca son las más indicadas para el tratamiento de las aguas salobres y agua de mar, variando la composición y tamaño de la membrana según el agua a tratar y el caudal deseado.

## **8.2.- Otros procesos**

---

La separación por procedimientos de membranas y por evaporación representa un porcentaje muy elevado del total de agua que se descontamina en el mundo, pero éstas no son las únicas tecnologías separativas que se conocen ni la desalación su única aplicación técnica. Existen otras que por uno u otro motivo no son tan ampliamente utilizadas pero que indudablemente tienen el peso suficiente como para ser consideradas.

Existen otros procesos distintos a los anteriormente comentados, generalmente de minoritaria aplicación pero no por eso menos destacables. Se trata aquí de tecnologías de depuración de aguas no basadas en las membranas ni en la volatilización del agua, sino en procedimientos distintos. Estos procedimientos son los que se observan en la siguiente clasificación:

- Intercambio iónico
- Procesos de congelación
- Destilación por membranas
- Humidificación solar

Entre ellas destacan la separación mediante Intercambio iónico y la Humidificación solar, de las cuales se destacan algunos aspectos importantes.

### 8.2.1- Intercambio iónico

Existe una posibilidad de eliminación de iones disueltos en líquidos que consiste en la utilización de materiales que tienen propiedades determinadas que permiten la captura de algunos iones, bien sean éstos de carga positiva o negativa según su especie.

La forma de Intercambio iónico más habitual es la utilización de resinas intercambiadoras. En esta técnica, se tiene un lecho de resina, que puede ser de naturaleza muy diversa y tener unas propiedades de intercambio también muy variables. Sobre este lecho de resinas se vierte de manera homogénea el líquido que se desea depurar y, al pasar a través del lecho, los iones del agua son intercambiados por aquellos que se encuentran en la superficie de la resina.

A la salida de la columna de intercambio en la que se encuentran confinadas las resinas, se tiene un líquido depurado con ausencia prácticamente total del ion que se deseaba eliminar y en su lugar otro ion procedente de las resinas que debe ser inocuo para el uso al que vaya a ser destinado el líquido depurado mediante esta técnica.

Las resinas pueden ser principalmente de dos tipos:

- Resinas aniónicas
- Resinas catiónicas

Las Resinas aniónicas son aquellas que por su estructura y composición permiten el intercambio de los aniones contenidos en un agua por grupos  $\text{OH}^-$ .

Las Resinas catiónicas son aquellas que, por los mismos motivos expuestos para las anteriores, permiten sustituir los cationes disueltos en el agua a depurar por grupos  $\text{H}^+$ .

La utilización en serie de columnas cargadas con resinas aniónicas y catiónicas permiten obtener como producto del proceso un agua prácticamente desmineralizada.

Por último, esta metodología tiene la ventaja adicional de poder recuperar las resinas gastadas, mediante circulación inversa de productos especialmente diseñados al efecto y con ello quedan preparadas para su reutilización en procesos depuradores.

### 8.2.2.- Procesos de congelación

Los procesos de congelación se basan en el fenómeno de cambio de estado del agua en hielo. En este proceso de cambio de estado, los compuestos disueltos siguen quedando disueltos en el agua que todavía no ha sido congelada. De este modo se tiene hielo con muy baja concentración de soluto y agua no congelada con una concentración muy elevada de sólidos disueltos.

Durante las décadas de 1950 y 1960 se hicieron avances significativos en el desarrollo de las técnicas de separación mediante congelación del agua, especialmente en el ámbito de la desalación de agua de mar, resultando posteriormente dejada de lado por la mayor eficiencia de otros métodos surgidos tras éste.

Se ha comprobado experimentalmente que en los procesos de congelación del agua salada, los iones de sales disueltos se excluyen de aquella agua que cambia de estado. De estos conocimientos experimentales se ha desarrollado una tecnología de desalación que consiste en provocar la congelación del agua de mar o salobre y la extracción de los trozos de hielo que se van formando respecto de la salmuera que queda en estado líquido. De este modo, al fundirse el hielo se tiene agua con un porcentaje muy pequeño de sales, que puede ser destinada a múltiples usos (Ibrahim Pereira, J.C. 1999).

En teoría, este método de obtención de agua depurada presenta un requerimiento energético menor que otras tecnologías como la evaporativa, y también un menor riesgo de aparición de incrustaciones (Ibrahim Pereira, J.C. 1999). Pero, como contrapeso a estas ventajas, la dificultad de separar los trozos de hielo que se van formando del concentrado que queda en estado líquido, supone un inconveniente difícil de salvar y que provoca que esta forma de separación a penas se utilice.

### 8.2.3.- Destilación por membranas

Este procedimiento de separación de agua combina los procesos de membrana con aquellos que emplean la destilación para la separación de las sales disueltas en el agua. En esencia consiste en la aplicación de calor sobre un recipiente en el que se encuentra el líquido alimento. Por acción de este calor se obtiene vapor de agua que se hace pasar por una membrana muy fina que tan sólo permite el paso de vapor de agua y no de agua en estado líquido. El vapor de agua pasa a través de la membrana y se enfría mediante refrigeradores para conseguir agua potable con un nivel muy bajo de compuestos en disolución.

Este sistema de separación presenta la ventaja de ser bastante sencillo aunque tiene el inconveniente de necesitar bastante espacio para la instalación de los aparatos.

### 8.2.4.- Humidificación solar

En la naturaleza, el agua se evapora hacia la atmósfera mediante la ayuda del calor del sol. El agua posteriormente se condensa y cae de nuevo en forma de lluvia para llegar por los ríos y acuíferos de nuevo al mar. Así se cierra, de forma muy simplista, el ciclo hidrológico.

El sistema de depuración mediante humidificación solar imita parte del ciclo hidrológico que de manera tan sencilla se ha descrito en el párrafo anterior. En concreto, imita la evaporación natural por efecto del calentamiento solar. En este sistema, se instalan unos recipientes muy poco profundos y con mucha superficie en la que pueda incidir el calor del sol. Estos recipientes, más bien balsas, se recubren con un elemento transparente que suele ser una lámina de cristal o metacrilato, de modo que el vapor de agua producido por el calentamiento se condensa en la lámina y se recoge mediante una leve inclinación de ésta que hace que las gotas de agua recién condensadas se desplacen hacia un colector ubicado en el extremo más bajo de la lámina.

Este método necesita grandes superficies para poder obtener caudales estimables, así como una inversión elevada difícil de amortizar y también presenta un inconveniente claro: el problema de la dependencia total del factor meteorológico: días fríos y nublados suponen una bajada espectacular del rendimiento del sistema.

En ensayos que se han realizado hasta la fecha se ha determinado que es difícil superar la cifra de 4 litros por metro cuadrado y día, de agua depurada recogida . Este bajo rendimiento es uno de los principales inconvenientes de este método, así como la ya comentada necesidad de espacio para conseguir cantidades estimables de agua dulce (Ibrahim Pereira, J.C. 1999). Por el contrario, como principal ventaja se tiene la total ausencia de energía necesaria para la separación, ya que la energía que se utiliza es la que nos proporciona directamente el sol y ésta, por el momento, es gratuita. Por lo que estamos ante el método de recuperación de agua más limpio de los que se conocen.

# PROCESOS TÉRMICOS DE SEPARACIÓN, RECUPERACIÓN Y ELIMINACIÓN DE CONTAMINANTES

IV

---

9. Generalidades	57
10. Evaporación súbita multietapa	59
11. Evaporación por efectos múltiples	61
12. Evaporación por compresión de vapor	63



## 9.- Generalidades

---

El objetivo habitual de la separación térmica, es la eliminación de las impurezas que el agua lleva disueltas y que hacen que ésta no sea aprovechable para determinados usos. Con las técnicas de separación, el ser humano ha conseguido transformar agua de mala calidad en agua de bajo contenido en contaminantes y esa condición ha permitido el uso del agua recuperada en usos para los que no hubiera sido utilizable un agua sin tratar. Tal es el caso de la recuperación de aguas de proceso en industrias galvánicas, la obtención de agua potable a partir de agua de mar, la obtención de agua de riego para cultivos de regadío en zonas casi desérticas y también la obtención de agua ultrapura para su uso en calderas y evaporadores.

Sintéticamente, una instalación de separación por procedimientos térmicos tiene la función de separar el agua entrante en dos partes; una parte será el agua con baja concentración de contaminante en disolución y otra parte que es agua con un elevado contenido en estos compuestos.

En esencia, un proceso de destilación es aquel en el que el agua se separa de las sustancias que lleva disueltas mediante la evaporación y posterior condensación de ésta. El agua, al evaporarse, puede ser transportada en forma de flujo de vapor hasta un lugar distinto al de su evaporación y allí ser condensada mediante refrigeración.

La depuración de agua por destilación se basa en la relativamente baja volatilidad de las sales frente a la del agua. Estos procesos sirven para eliminar del agua sustancias tales como sólidos disueltos, pero no sirven para separar el agua de otros compuestos que tengan un punto de ebullición similar o cercano al del agua. Así mismo, si la temperatura a la que se destila el agua es muy elevada (superior a 300°C), se puede estar arrastrando, por volatilización, parte de aquellos productos que se desea eliminar.

Los procesos de separación por evaporación son mayoritariamente utilizados para la desalación, aunque también tienen innumerables usos en el sector industrial como

procesos de concentración, recuperación y eliminación de productos y/o contaminantes (Porteous, A. 1975), y pueden clasificarse según:

- Evaporación súbita multietapa (MSF)
- Evaporación por efectos múltiples (MED)
- Evaporación por compresión de vapor (VC)

Existen diversas técnicas evaporativas para la separación del agua de sus contaminantes. Algunas son más sencillas y otras algo más complejas pero todas éstas se basan en el ya comentado fenómeno de la volatilidad. En el caso particular del agua de mar, ésta es más volátil que las sales que lleva disueltas, por ello, aplicando calor puede provocarse un cambio de estado en el agua y no en las sales y así propiciar la separación del agua de aquellas impurezas que no se desea tener disueltas y es preferible eliminar.

Los procedimientos térmicos de separación son muy utilizados en la industria en un amplio abanico de aplicaciones. Muchas de estas aplicaciones tienen que ver con la descontaminación de efluentes y la recuperación de materias primas previas a la eliminación de los residuos generados en los procesos industriales. En el caso particular de la potabilización de aguas, en la actualidad, más del 60% de las aguas desaladas se obtienen mediante técnicas de destilación. Estas técnicas evaporativas, sea cual sea su aplicación, pueden optimizarse mediante el control de la temperatura y la presión a la que se encuentra el líquido a evaporar.

Las técnicas más importantes de separación por procedimientos térmicos son las que se presentan:

## 10.- Evaporación súbita multietapa (MSF)

---

La evaporación súbita en múltiples etapas es en la actualidad un método muy utilizado, tanto en el ámbito industrial como, principalmente, para la desalación de agua (Medina San Juan, J.A. 2000; Porteous, A. 1975). Ha sido en las últimas décadas cuando este método de separación térmica ha vivido su época más importante ya que desde 1960 hasta la década de los 90 este método ha hecho posible un aumento muy considerable de la capacidad instalada en plantas de desalación de agua de mar.

La evaporación súbita multietapa consiste en calentar el líquido alimento en un recipiente y acto seguido conducir el agua por un sistema de tuberías de calentamiento en el que parte del agua pasa a ser vapor. Después pasa a otro recipiente en el cual la presión y temperatura son tales que una parte del agua caliente pasa súbitamente a vapor de agua dejando en forma líquida un remanente concentrado que pasa a alimentar la siguiente etapa. Tras esto se deja enfriar el vapor hasta que vuelve a licuarse y entonces se recoge libre de impurezas. A continuación se repite el proceso en otra etapa. Tras una serie determinada de etapas, se consigue agua que se ha destilado repetidas veces de manera muy rápida y que, por ello, contiene muy poca cantidad de contaminantes disueltos.

DESTILACIÓN FLASH MULTI-ESTADO

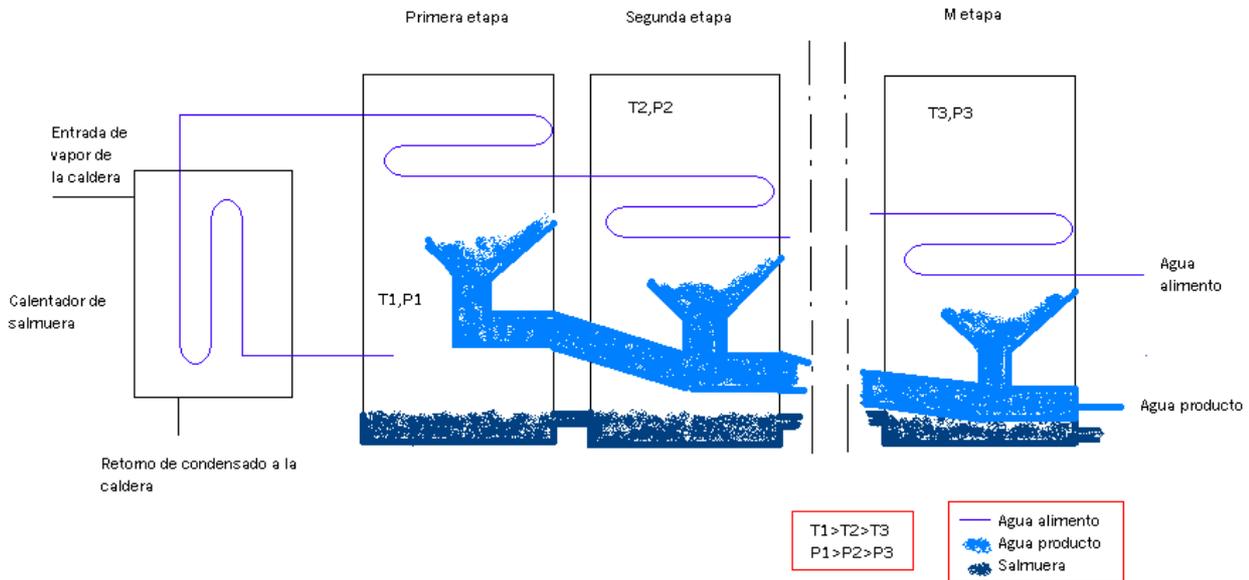


Figura 10.1.- Esquema de una planta de evaporación súbita multietapa. Adaptada de Ibrahim Pereira, J.C. 1999

Es frecuente disponer de entre 4 y 40 etapas en una planta MSF de separación.

También es frecuente en este tipo de procesos de separación la presencia de sistemas de recirculación del concentrado y del agua ya destilada, con el objetivo de aprovechar el calor que dichas aguas contienen en el calentamiento del agua entrante a la planta y con ello lograr una reducción del consumo total de energía en el proceso. También es común la instalación de sistemas de reducción de la presión en las etapas de evaporación para reducir con ello el punto de ebullición del agua y lograr una destilación con unos requerimientos energéticos menores.

Se han construido este tipo de desaladoras desde los años 50, siendo su rango de temperaturas en funcionamiento el comprendido entre 90 y 120°C para el calentamiento inicial de la salmuera. El trabajo a temperaturas inferiores a 110 – 120°C supone un aumento de la eficiencia térmica pero por el contrario también supone un aumento del riesgo de provocar incrustaciones y de corrosión de las paredes de tuberías y calderas.

## 11.- Evaporación por efectos múltiples (MED)

---

La evaporación por efectos múltiples ha sido un método de destilación muy empleado durante el último cuarto del siglo XX para la producción de azúcar a partir del jugo de caña de azúcar y también para la producción de sal a partir de agua de mar. Aún hoy se emplea este método en algunas plantas desaladoras, pero lo normal es que sean sustituidos por métodos de evaporación súbita multietapa debido a la mayor economía de este último método.

Este procedimiento es similar al anterior aunque presenta destacables diferencias. Consiste en calentar el agua alimento mediante el aprovechamiento del calor residual de aguas ya tratadas y conducirla hasta una serie de tanques a los que llega caliente pero todavía en estado líquido. En estos tanques el agua se distribuye en películas finas a fin de facilitar la evaporación a base de reducir la presión. El fenómeno de reducción progresiva de la presión permite que el agua alimento sufra procesos de licuefacción y evaporación continuamente sin necesidad de ir añadiendo calor al sistema.

Este tipo de procedimientos evaporativos suele tener entre 8 y 16 efectos o pasos repetidos en serie en los que el agua sobrante de cada efecto se envía al siguiente para ser evaporada allí. Estas plantas desaladoras suelen trabajar a una temperatura de 70°C ya que esto evita que se produzcan incrustaciones en tubos y calderas.

### DESTILACIÓN MULTIEFECTO

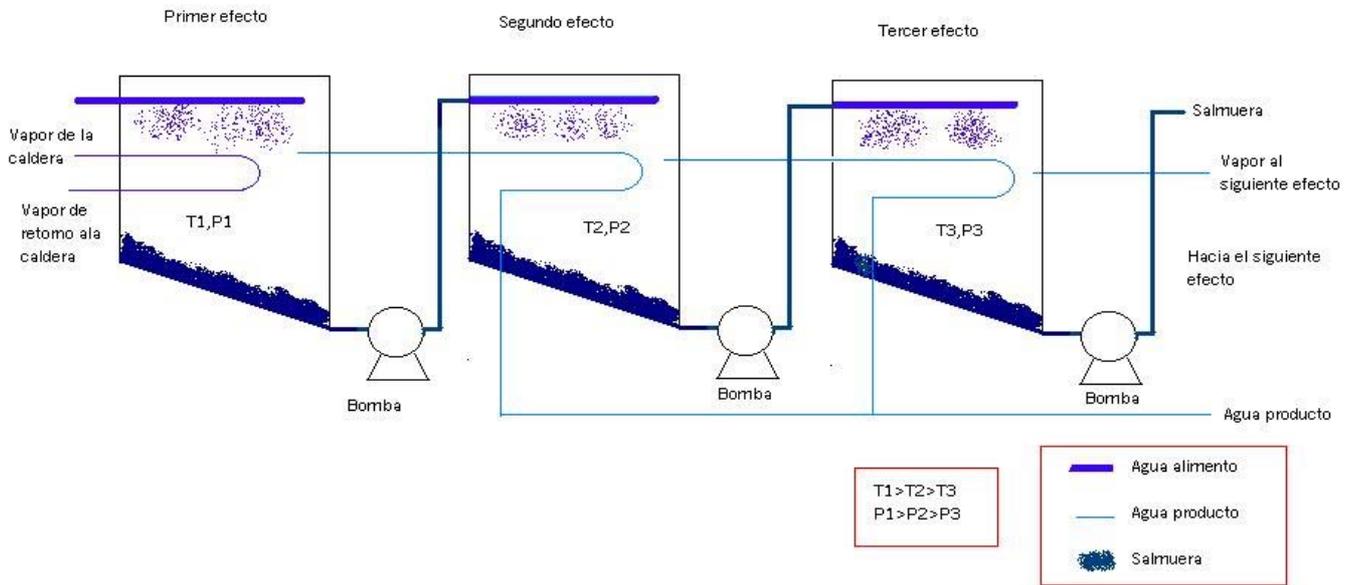


Figura 11.1.- Esquema de una planta de evaporación por efectos múltiples. Adaptada de Ibrahim Pereira, J.C. 1999

## 12.- Evaporación por compresión de vapor (VC)

---

Este método de eliminación de contaminantes por evaporación consiste en el aprovechamiento de vapor comprimido. Se suele emplear en plantas de mediano o pequeño tamaño debido a que para volúmenes grandes existen otras tecnologías que resultan más rentables.

El proceso en sí consiste en la evaporación del agua a base de suministrarle calor procedente de la compresión de vapor, en vez de transmitir el calor mediante contacto directo con un cuerpo sólido caliente. Las plantas de destilación por compresión de vapor se diseñan para que funcionen reduciendo el punto de ebullición del agua mediante disminución de la presión.

El compresor crea vacío en un extremo de un recipiente por donde extrae el vapor de agua formado, pero por el otro extremo, comprime dicho vapor formado y lo condensa en el interior de unos tubos. El agua de mar a desalar cae sobre estos tubos calientes y se evapora. Se consiguen resultados destacables si se emplea una reducción de la presión en los tanques de evaporación en los que se encuentra la solución alimento. Posteriormente, mediante compresión del vapor y puesta en contacto de éste con el agua alimento, se logra la evaporación del agua y la eliminación de las sales en una salmuera muy concentrada.

DIAGRAMA DE UNA PLANTA DE COMPRESIÓN DE VAPOR MECÁNICA

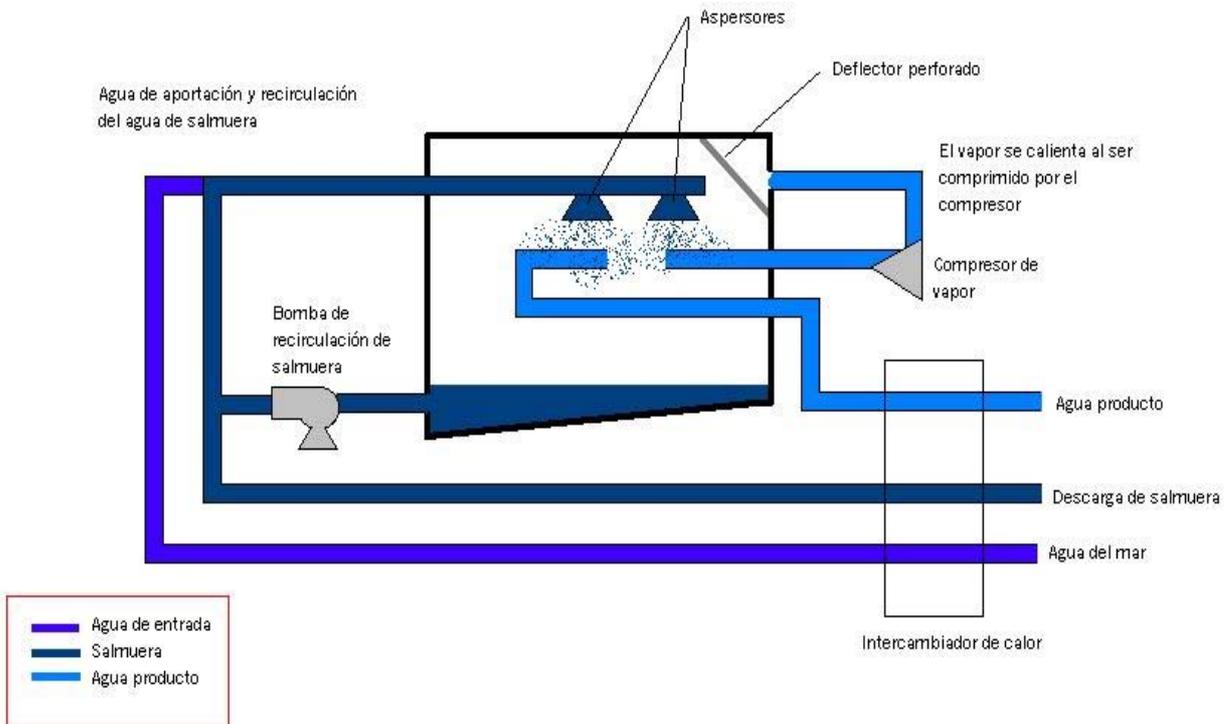


Figura 12.1.- Esquema de una planta de evaporación por compresión de vapor.

Adaptada de Ibrahim Pereira, J.C. 1999

Estas plantas tienen también una variante que provoca la succión del vapor en la cámara de generación del mismo y la posterior compresión de este vapor mediante un tubo venturi. En este caso, inmediatamente pasado el venturi, el vapor se condensa por compresión, se reconduce a la cámara de evaporación por unos tubos y sirve para provocar el calentamiento del líquido alimento entrante que se pulveriza sobre éstos.

## OBJETO

---

V

13. Objeto	67
14. Justificación de la investigación	69
15. Objetivos	73



## 13.- Objeto

---

La Tesis Doctoral que se presenta tiene una doble intención:

Por una parte, el autor pretende obtener el grado de Doctor, dentro del Programa de Doctorado “Tecnología de membranas, electroquímica y medio ambiente, seguridad nuclear” cursado y que imparte el Departamento de Ingeniería Química y Nuclear de la Universidad Politécnica de Valencia.

Por otra parte, también se pretende con el trabajo realizado, recuperar una metodología algo olvidada en la actualidad como es la evaporación por película ascendente para usos descontaminadores, dando así un nuevo impulso a los procedimientos térmicos en este ámbito y en concreto en el de la recuperación de iones metálicos en las aguas.

Tras lo anteriormente descrito, debe tenerse en cuenta que la valorización de las aguas descontaminadas así como de los iones metálicos recuperados puede abrir nuevas posibilidades a estas técnicas.



## 14.- Justificación de la investigación

---

Desde la Revolución Industrial hasta nuestros días, los metales están apareciendo en concentraciones anormalmente elevadas en el aire, el suelo y las aguas del planeta, pasando a contaminar los ecosistemas en los que se detectan y donde con anterioridad tan sólo eran oligoelementos, para transmitirse a los seres vivos por medio de las cadenas tróficas.

Hoy en día, tras haberse realizado importantes estudios al respecto (Benjamín, M.M.; Honeyman, B.D. 1992, Climent, M.D. et al. 1992, Coello, M. et al. 2002 y otros), se sabe que las actividades humanas del sector secundario (la industria principalmente) son las causantes directas de esta anormal presencia de iones metálicos en la naturaleza.

Un ejemplo claro que refuerza la idea de lo anteriormente descrito es el caso del desastre ecológico de contaminación por metales generado por la rotura de una parte de los muros de contención de la balsa de estériles de la explotación minera de la empresa Boliden-Aprisa en Aznalcóllar (Sevilla) ocurrido en abril de 1998 (ver Anexo IV).

Los metales presentan una problemática ambiental concreta que se define en detalle en el Capítulo II de la presente Tesis Doctoral y que sintéticamente puede resumirse en lo siguiente: La presencia de metales en concentraciones anormalmente elevadas en los ecosistemas afecta a plantas, animales y al ser humano, bioacumulándose en los organismos vivos, de manera muy diversa en función del metal, forma de presentación, vía de entrada al organismo y periodo de exposición al contaminante, pero en general las afecciones más comunes son: En las plantas, disminución de la capacidad fotosintética, reproductora y necrosis foliar. En los animales, alteraciones del comportamiento y la reproducción y fallos renales y hepáticos. En el ser humano son frecuentes las afecciones de origen industrial como fallo renal y hepático, alteraciones del sistema nervioso central, cáncer de piel y pulmón y posibles efectos mutagénicos.

Por esto, el trabajo de investigación en el que se fundamenta la presente Tesis Doctoral obedece al desarrollo de una de las líneas investigadoras en que trabaja el grupo

TECAR de investigación, dirigido por el Prof. José García Garrido, que persigue la descontaminación de aguas contaminadas con iones de metales pesados mediante procedimientos técnicamente asumibles, costes razonables y las mayores ventajas posibles para el medio ambiente.

El conocimiento de la problemática ambiental que generan determinados residuos de origen industrial, así como de las posibilidades reales de descontaminación por procesos térmicos componen el punto de partida de este trabajo, coincidiendo con las inquietudes que motivan el desarrollo de la citada línea investigadora.

Si bien es cierto que los procedimientos no térmicos han evolucionado mucho en las últimas décadas hasta abrir un nuevo mercado en el importante marco de la desalación de aguas en el planeta (Valiente-Barderas, A. 1995), no es menos cierto que son el consumo energético y la economía del proceso los factores que al final deciden la aplicación de uno u otro sistema para la descontaminación de aguas.

En este sentido, la asunción de la hipótesis de partida de disponer de un caudal suficiente de agua caliente residual de origen industrial hace de los procedimientos térmicos una opción muy atractiva, desde los dos puntos de vista anteriormente descritos, en el ámbito de la eliminación de metales de efluentes líquidos.

El párrafo anterior muestra la importancia que el coste de la energía puede llegar a tener en la elección de una u otra tecnología para la realización de un proceso de descontaminación de aguas. Es por ello por lo que se ha considerado interesante desarrollar la presente Tesis Doctoral en este ámbito en el que las tecnologías de separación compiten entre sí en términos energéticos, económicos, ambientales y de tecnología para dar forma a un marco de investigación regido por las siguientes consideraciones de partida:

La consideración principal, en la que se engloban las demás y que sirve como encuadre de los trabajos de investigación realizados, es la de lograr, mediante la aplicación de tecnologías evaporativas y en concreto la Evaporación por Película Ascendente, la recuperación de aguas contaminadas con iones de metales pesados, con los

condicionantes de realizar todo esto con un coste aceptable y también con las máximas ventajas posibles para el medio ambiente.

A partir de esta consideración de tipo general, surgen otras que centran el trabajo en un ámbito más concreto, como son:

- La utilización de tecnologías evaporativas para la recuperación de aguas contaminadas con iones de metales pesados.
- El aprovechamiento de una fuente residual de calor como es el agua saliente de determinados procesos industriales de tipo térmico.
- La disminución de la carga contaminante mediante la concentración de los metales hasta un nivel suficiente para ser aprovechados o bien para su eliminación como residuo de manera controlada y más económica.

A partir de estas directrices comienza a tomar forma la Tesis Doctoral desarrollada, titulada “Evaluación del rendimiento de recuperación de vertidos contaminados por iones de metales pesados mediante técnicas evaporativas. Análisis energético y económico”, y que presenta como objetivo principal el que se describirá en el apartado siguiente.



## 15.- Objetivos

---

El objetivo general de la tesis que se presenta es el de probar la validez técnica, energética y económica de la tecnología térmica de evaporación por película ascendente para la recuperación de aguas contaminadas con iones metálicos pesados, en el supuesto de disponer, para su aprovechamiento y valorización, de un caudal suficiente de agua caliente residual de un proceso industrial previo. Con ello se consigue, no sólo la reutilización de un residuo de tipo industrial, lo cual ya es positivo desde el punto de vista medioambiental, sino también su uso en un proceso de descontaminación de aguas que genera como productos, por una parte agua depurada y por otra un concentrado de metales que puede tener interés industrial.

Este objetivo general se subdivide en objetivos más específicos que han ido alcanzándose con el avance de las distintas fases del trabajo de investigación desarrollado. Estos objetivos concretos son los siguientes:

1. Diseñar y poner en marcha distintas configuraciones de un Modelo de Evaporación por Película Ascendente (MEPA).
2. Definir las variables termohidráulicas que intervienen en el proceso evaporador.
3. Determinar la calidad del destilado y del concentrado obtenidos con cada una de las configuraciones MEPA ensayadas.
4. Determinar y comparar las características energéticas del proceso evaporativo en las distintas configuraciones MEPA ensayadas.
5. Determinar la economía de cada opción ensayada para la descontaminación de aguas con iones metálicos, en las condiciones asumidas en el objetivo general.

De la planificación y realización de las distintas tareas que han sido necesarias para la satisfacción de estos objetivos se deriva la estructura de la presente Tesis Doctoral.



## METODOLOGÍA

VI

---

16. Justificación de la elección de un Modelo de Evaporación de Película	
Ascendente (MEPA)	77
17. Desarrollo de la investigación	79
18. Descripción de las instalaciones	83
19. Protocolo de ensayos	101
20. Diseño experimental	103
21. Métodos analíticos	109



## 16.- Justificación de la elección de un Modelo Evaporador de Película Ascendente (MEPA)

---

Uno de los procedimientos para la separación por evaporación es el del uso de evaporadores de pared delgada, en los que en dos tubos concéntricos se provoca, en el conducto interior, la evaporación del disolvente y la concentración del soluto mediante corrientes de vapor que circulan por la parte más externa del sistema. Existen múltiples variantes dentro de este tipo de evaporadores, desde el empleo de múltiples fases de evaporación hasta el uso de una única fase o efecto simple, desde evaporadores de película ascendente hasta aquellos en que la película discurre de manera descendente. De circulación libre o forzada... pero de todos ellos, por sus características y adaptación a las necesidades del trabajo desarrollado se ha elegido un Modelo de Evaporador de Película Ascendente (MEPA), diseñado y montado con distintas configuraciones.

Aunque la selección del tipo de evaporador más conveniente también depende de las características del fluido con el que se pretenda trabajar, en el caso que nos afecta, los evaporadores de película ascendente resultan adecuados ya que existen precedentes de su empleo con éxito en otros tipos de industrias, lo que hace pensar que su aplicación para el caso de estudio sea adecuada ([www.processfood.com](http://www.processfood.com) entre otras).

Los evaporadores de película ascendente, según documentación de diversas empresas del sector de la evaporación, tienen las siguientes ventajas (FOODTECH [www.fmcfoodtech.com](http://www.fmcfoodtech.com) entre otras):

- Alta eficiencia, economía y rendimiento.
- Alta flexibilidad operativa.
- Elevados coeficientes de transmisión de calor.
- Posibilidad de trabajo con líquidos termosensibles.
- Limpieza y mantenimiento sencillos.

Por estas características, por su adecuación a las propiedades de los líquidos a concentrar y por el interés que esta tecnología puede llegar a tener en el campo de la concentración y valorización de aguas contaminadas por iones metálicos, se ha optado por trabajar en el laboratorio con un MEPA y las distintas configuraciones del mismo que se detallarán posteriormente.

Una vez realizada la elección del MEPA, se eligió para su funcionamiento un flujo a co-corriente. Esta elección está basada en que, tras la realización de una serie de pruebas preliminares y como consecuencia directa de éstas, se determinó que, para las condiciones de trabajo fijadas, era más práctica, sencilla y homogénea esta forma de funcionamiento frente a la teóricamente más eficiente contracorriente.

Desde un punto de vista operativo, una de las ventajas más destacables de la co-corriente frente a la contra-corriente, y que hizo que la decisión fuera clara a favor de la primera opción, fue la frecuente aparición de burbujas de aire en el intercambiador de calor como consecuencia de la utilización de agua de la red de agua potable del Excmo. Ayuntamiento de Valencia como líquido de calefacción.

La acumulación de las burbujas de aire presentes en el agua servida por el Excmo. Ayuntamiento de Valencia provocaban, en los montajes preliminares a contra-corriente, una disminución del área de contacto agua-intercambiador que dificultaba e interrumpía el fenómeno de intercambio calorífico. Estas burbujas aumentaban también el riesgo de descebado de la bomba de impulsión interrumpiéndose con esto el flujo de agua caliente en el sistema.

Estos inconvenientes operacionales eran, en cambio, fácilmente subsanables en el caso de trabajar con un montaje a co-corriente, ya que para este caso, el propio flujo de agua de calefacción ascendente a lo largo del intercambiador facilitaba el arrastre y eliminación de las burbujas de aire que aparecían evitando así la acumulación de éstas en el intercambiador y disminuyendo el riesgo de interrupción del proceso de intercambio térmico.

## 17.- Desarrollo de la investigación

---

Para poder alcanzar el objetivo marcado fue precisa la realización de una planificación exhaustiva de los trabajos a realizar. Estas tareas realizadas pueden describirse de manera generalista como se muestra a continuación:

En primer lugar se realizó una búsqueda bibliográfica, labor que en realidad se ha desarrollado a lo largo de todo el período investigador pero que ha tenido dos etapas de especial intensidad. La primera, previa a la realización de los ensayos de laboratorio, en la que se procedió a la recopilación y estudio de aquellas monografías que se consideraron de más relevancia para los trabajos a realizar. La segunda, habiéndose realizado ya las pruebas y ensayos preliminares, en la que procedió a recopilar aquellos artículos de investigación de relevancia mayor.

Tras esto, otro grupo destacable de actividades realizadas dentro del periodo investigador fue el del diseño y puesta en marcha de los distintos montajes a utilizar del MEPA. Estos trabajos fueron los primeros que se realizaron en el laboratorio y corresponden a la etapa preliminar de la Tesis Doctoral, aunque también se realizaron acciones en este sentido en distintos momentos repartidos a lo largo de todo el periodo investigador. En esta fase de la investigación se utilizaron disoluciones de NaCl, por tratarse ésta de una disolución considerada modelo y que ha servido de referencia para todos los ensayos realizados tras éstos con disoluciones de otros compuestos químicos.

Parcialmente simultaneadas con las tareas anteriores se procedió a la realización de ensayos con los montajes, así como a su organización, clasificación y preparación previa, quedando todos los datos y resultados obtenidos en esta fase recogidos en las tablas de ensayos preparadas a tal efecto. Esta fase del proceso investigador se realizó al objeto de determinar la calidad del destilado y del concentrado obtenidos con cada una de las configuraciones MEPA ensayadas. En esta fase se emplearon disoluciones de NaCl, CaCl<sub>2</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, CuSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub> y NiSO<sub>4</sub> a distintas concentraciones, tal como se mostrará más adelante.

Una vez concluida la fase de realización de ensayos se procedió a la obtención de resultados energéticos, realización de cálculos y comparación entre ellos para la satisfacción del objetivo de determinación y comparación las características energéticas del proceso evaporativo en las distintas configuraciones MEPA ensayadas.

Tras la obtención de resultados energéticos se pudo preparar la realización de cálculos económicos así como la comparación entre los mismos para la determinación de la opción menos costosa. Estas labores ocuparon el penúltimo eslabón de la cadena de tareas planificadas para la realización de la Tesis Doctoral.

La tarea final que concluye el planning diseñado al comienzo del período investigador consistió en la redacción del presente documento que describe sintéticamente el trabajo de investigación realizado y persigue confirmar la validez técnica y energética así como el interés económico y medioambiental de la aplicación de diversos MEPA a la descontaminación de aguas procedentes de determinadas actividades industriales.

No obstante, este documento no supone un “final de trayecto” sino que se pretende sirva de base para la realización futuros estudios en esta y otras líneas de investigación que surjan de la primera y profundicen en las múltiples aplicaciones de los procedimientos térmicos de separación en los ámbitos de la industria y el medio ambiente.

Por último, para una mejor comprensión de los trabajos realizados se presenta, en forma de diagrama, la planificación diseñada previamente:

VI.- METODOLOGÍA

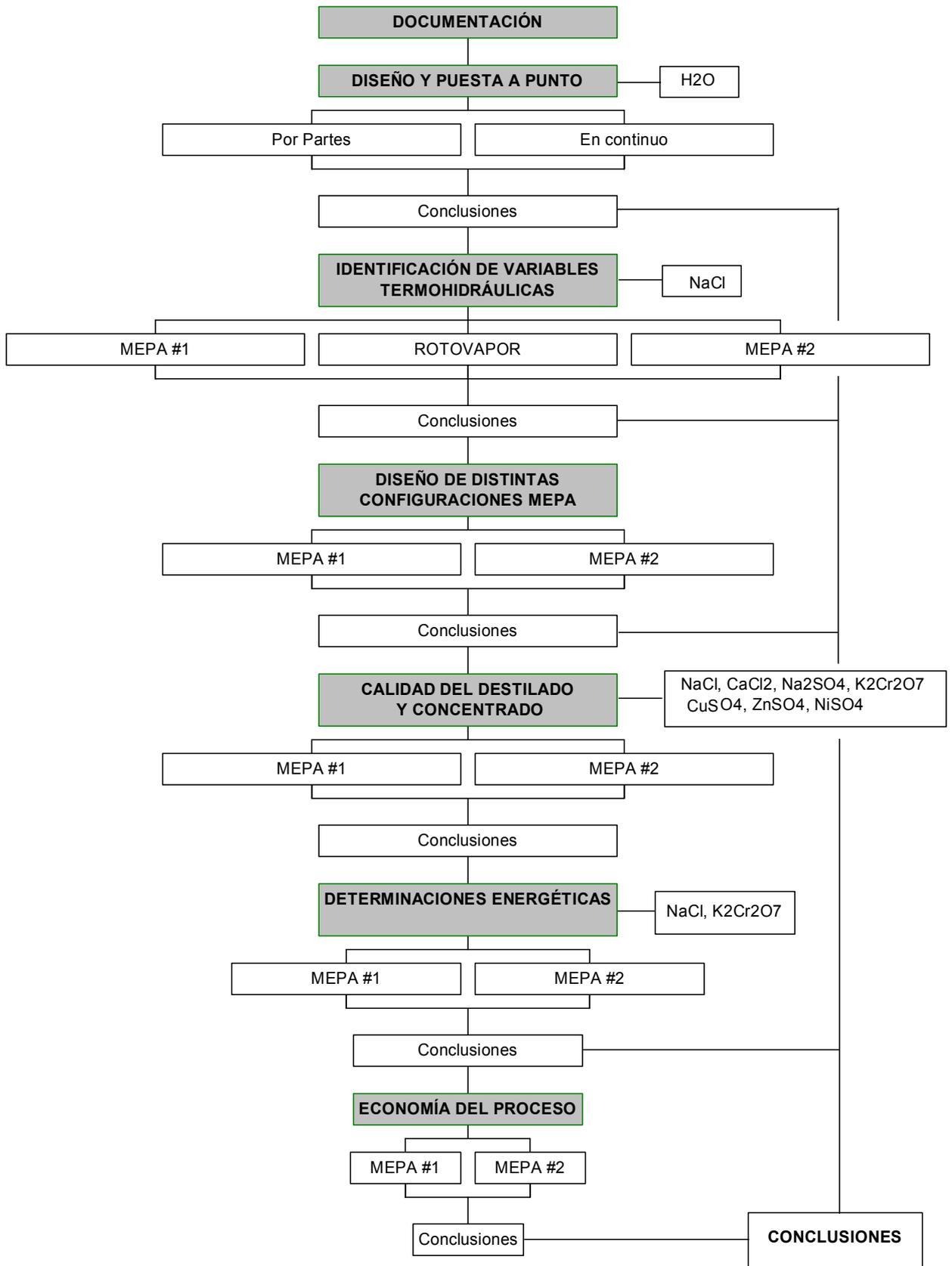


Figura 17.1.- Diagrama detallado del proceso investigador



## 18.- Descripción de las instalaciones

---

El MEPA empleado en el laboratorio para la realización de los ensayos que se describen en la presente Tesis Doctoral consta de un sistema intercambiador de calor que se ha utilizado con dos configuraciones básicas distintas: intercambiador de columna simple vertical e intercambiador de doble columna en espiral. Se han diseñado, montado y ensayado también diferentes formas de funcionamiento particulares para cada una de estas dos configuraciones básicas.

Además de esto, el sistema lo componen un juego de dos matraces redondos con finalidad expansora, un fino tubo recirculador del condensado y el sistema refrigerador conformado por dos serpentines de doble camisa. También forma parte del aparato un sistema generador del vacío necesario para la evaporación compuesto por una bomba de vacío (se han utilizado tres bombas distintas como se detalla a continuación) y un sistema generador de calor (para los primeros ensayos se utilizó un generador de vapor, tras esto se empleó una resistencia sumergida en un recipiente y para los ensayos posteriores, un calentador comercial).

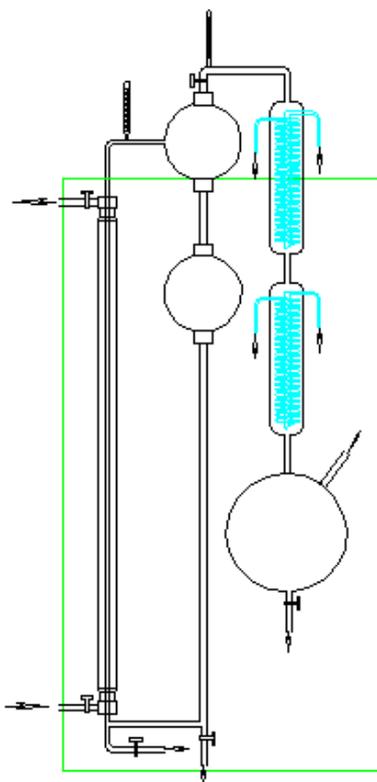


Figura 18.1.- Croquis general del mepa utilizado

A continuación se realizará una descripción detallada de cada uno de estos elementos para su mejor identificación y caracterización. Así, el MEPA está compuesto por:

### **Sistema de aporte de calor**

El sistema calefactor elaborado se encarga de generar el calor necesario para el funcionamiento del proceso evaporativo, así como de transmitir dicho calor al lugar donde se va a realizar la evaporación. En esencia, la finalidad del aparato es la de transmitir al agua del circuito de calefacción el calor necesario para promover el proceso evaporativo deseado. Este sistema consta de un calentador eléctrico de 50 litros de capacidad y 1.500W de potencia y una bomba impulsora de 60W que hace circular el agua por el sistema de calefacción a una temperatura de entre 60 y 65°C con un caudal aproximado de 3 l/min.



Figura 18.2.- Calefactor



Figura 18.3.- Bomba impulsora

Para los ensayos preliminares se hizo servir un generador de vapor compuesto por una manta calefactora de la marca PILZ, modelo U8P, tipo 2680, un matraz de fondo redondo en el que se aloja el agua caliente de 1200 ml de capacidad, un termostato con diversas posiciones, un conducto de transporte del vapor generado y un sistema de alivio de la presión. Las características generales de este generador de vapor son las siguientes:

Tabla 18.1.- Características del generador de vapor utilizado en los primeros ensayos

<i>Características del generador de vapor.</i>	
<i>Volumen de caldera.</i>	1200 ml
<i>Voltaje.</i>	220 V AC
<i>Potencia.</i>	500 Watt

Debido a las dificultades que planteaba el manejo y control de la transmisión de calor mediante este aparato, el generador de vapor fue posteriormente sustituido por un baño termostático a base de un recipiente de Polipropileno y una resistencia de 1200W, junto

a una bomba de pecera que impulsa el agua caliente a través de la camisa del tubo evaporador para transmitir el calor al líquido contenido en el interior del tubo evaporador.

Este baño termostático hace las labores inicialmente encomendadas al generador de vapor, es decir, producir y transmitir el calor generado al modelo físico diseñado. La principal diferencia radica en que el baño termostático produce agua caliente y no vapor como ocurría en el caso anterior. Con esto, el agua caliente generada se hace pasar por una serie de conducciones de silicona que transportan el líquido calefactor hasta el tubo evaporador, donde el agua caliente va perdiendo calor para transmitirlo al alimento. Tras esto, el agua de calefacción es devuelta al recipiente de Polipropileno donde por acción de la resistencia de 1.200 W vuelve a calentarse hasta los 80°C para ser recirculada de nuevo mediante la bomba sumergida en el recipiente.

En todo este proceso intervienen los siguientes elementos:

- Bomba sumergida, que impulsa el agua caliente hacia el sistema transmisor de calor.
- Resistencia de 1.200 W que genera el calor suficiente para que el agua se caliente hasta 80°C.
- Recipiente de polipropileno, cilíndrico y de unos 8 litros de capacidad, contiene el agua caliente lista para ser impulsada al sistema.
- Tubos de silicona, encargados de transportar el agua caliente desde el recipiente contenedor hasta el evaporador de película ascendente.
- Llaves de cierre, dispuestas inmediatamente antes de la entrada en el tubo evaporador e inmediatamente después de la salida del agua desde dicho tubo. Con la apertura de estas llaves, la bomba puede impulsar agua a través del sistema. Con el cierre de estas llaves, el sistema queda cebado y preparado para su próxima utilización.

Las características de la bomba sumergida utilizada para la impulsión del agua caliente a través del tubo evaporador tiene las siguientes características técnicas:

Tabla 18.2.- Características de la bomba sumergida para los ensayos con recipiente y resistencia

<b>Características técnicas de la bomba sumergida.</b>	
<b>Voltaje</b>	230 V
<b>Frecuencia.</b>	50 Hz
<b>Potencia.</b>	4 W
<b>Intensidad.</b>	0.024 A
<b>Altura máxima de impulsión.</b>	0.5 m
<b>Caudal máximo en condiciones óptimas.</b>	300 l/h

Posteriormente, para la realización del grueso de los ensayos, se utilizó el calentador de 1.500W y la bomba de recirculación de 60W que se han descrito al principio de este punto.

### Sistema de generación de vacío

Una bomba de vacío se encarga de suministrar una presión inferior a la atmosférica al líquido que se desea evaporar. Unas conducciones a base de tubos de polietileno transmiten dicho vacío al interior del modelo físico. En estos tubos se controla el vacío mediante unos vacuómetros y unas llaves que permiten regular la entrada de aire en el sistema y con ello, el vacío que la bomba ejerce en el interior del aparato evaporador. El vacío generado para los ensayos oscila en torno a los 60-62 cmHg.

La bomba de vacío con la que se ha estado trabajando es una bomba de la marca TELSTAR, tipo Torricelli modelo RD-18, serie A9C86 del año 1997 Esta bomba se ha ubicado encima de una mesa de laboratorio, conectada a una toma de red trifásica a un lado del montaje del aparato de evaporación y posee las siguientes características:

Tabla 18.3.- Características de la bomba de vacío TELSTAR RD-18

<b>Características de la bomba de vacío TELSTAR RD-18.</b>	
<b>Caudal.</b>	20 m <sup>3</sup> /h
<b>Potencia.</b>	750 W
<b>r.p.m.</b>	1.400
<b>Frecuencia.</b>	50 Hz
<b>Voltaje.</b>	220/380 Trifásica
<b>Intensidad.</b>	3.4/2 A
<b>Tipo de aislamiento eléctrico.</b>	“B”
<b>Vacío Límite.</b>	1·10 <sup>-3</sup> bar
<b>Subpresión suministrada.</b>	Rango variable entre 0 y 640 mm Hg

También se han realizado pruebas y determinaciones con otras dos bombas que son las siguientes: Bomba TELSTAR S-4 y bomba KNF Neuberger N 035.3, que tienen las siguientes características técnicas:

Tabla 18.4.- Características de la bomba de vacío TELSTAR S-4

<b>Características de la bomba de vacío TELSTAR S-4.</b>	
<b>Caudal.</b>	4 m <sup>3</sup> /h
<b>Potencia.</b>	150 W
<b>r.p.m.</b>	1.450
<b>Frecuencia.</b>	50 Hz
<b>Voltaje.</b>	220
<b>Tipo de aislamiento eléctrico.</b>	“B”
<b>Vacío Límite.</b>	3·10 <sup>-3</sup> bar
<b>Subpresión suministrada.</b>	Rango variable entre 0 y 640 mm Hg

Tabla 18.5.- Características de la bomba de vacío KNF NEUBERGER N 035.3.

<b>Características de la bomba de vacío KNF Neuberger N 035.3.</b>	
<b>Caudal.</b>	1,8 m <sup>3</sup> /h
<b>Potencia.</b>	200 W
<b>Frecuencia.</b>	50 Hz
<b>Voltaje.</b>	230
<b>Intensidad.</b>	1,55 A
<b>Vacío Límite.</b>	13·10 <sup>-3</sup> bar
<b>Subpresión suministrada.</b>	Rango variable entre 0 y 640 mm Hg

El resto de elementos que componen el montaje son piezas diversas de vidrio y aparatos de medida. Además, cuando corresponde por las características de las bombas, éstas se presentan con válvulas anti-retorno, sistema de refrigeración por aire, conexiones estándar y otros accesorios. Los más destacables de estos elementos se describen a continuación de manera breve:



Figura 18.4.- Bomba de vacío KNF NEUBERGER N 035.3.

- Anti-retorno. Las bombas que funcionan con aceite llevan incorporado un sistema anti-retorno del mismo. Así, el cuerpo de la bomba permanece en vacío cuando el motor se detiene, evitándose posibles procesos de oxidación en el interior de la bomba.
- Engrase. Estos modelos poseen un sistema de lubricación forzada, además de un filtro de aceite de fácil sustitución. Esto permite una aportación constante y a presión de aceite limpio a los rodamientos de fricción. El aceite comunmente usado en estas bombas es el AV-30.
- Refrigeración. Se realiza por aire. Además estos sistemas disponen de serpentín y turbina para conseguir temperaturas de trabajo poco elevadas.
- Conexiones. Todos los modelos poseen bridas de conexión sistema PNEUROP (KF), tanto en la aspiración como en la expulsión, que permite la fácil adaptación de diversos accesorios.
- Accesorios. Estas bombas de vacío pueden equiparse de válvulas de seguridad, filtros a la aspiración y al escape, bridas, vacuómetros,...

### **Intercambiadores de calor**

Se han utilizado dos configuraciones básicas distintas de tubos intercambiadores de calor que en esencia consisten en al menos dos tubos concéntricos en los que, por el tubo interior, circula el líquido a evaporar y por el tubo externo circula el agua caliente que se emplea como transmisor de calor al líquido alimento. Los tubos intercambiadores, que están forrados externamente con productos aislantes térmicos para disminuir la pérdida de energía por transmisión de calor al exterior del sistema, se han utilizado en los ensayos con estas dos configuraciones básicas de montaje distintas. A saber:

1.- Intercambiador de tubo recto vertical. Consistente en una columna recta de 1,60 m de altura y 3,5 cm de diámetro exterior con otro tubo de diámetro menor concéntrico. El

sistema intercambiador de tubo recto vertical dispone de las correspondientes bocas de entrada y salida tanto del alimento como del líquido calefactor. Las dimensiones de este tubo evaporador son las siguientes:

Tabla 18.6.- Características del intercambiador de tubo recto vertical

<i>Características del intercambiador de tubo recto vertical</i>	
<i>Longitud.</i>	1,60 m
<i>Diámetro interior del tubo interior.</i>	1,1 cm
<i>Diámetro exterior del tubo interior.</i>	1,5 cm
<i>Diámetro interior tubo exterior.</i>	3,1 cm
<i>Diámetro exterior tubo exterior.</i>	3,5 cm

Se desea destacar que estos tubos evaporadores son extremadamente frágiles ya que, para facilitar la transmisión de calor, se fabrican con espesores muy pequeños, en vidrio. Por ello son muy sensibles a los golpes y a las alteraciones bruscas de presión y temperatura.

En las figuras 18.5 y 18.6 se muestra un croquis y una fotografía que complementan la descripción del aparato evaporador de película ascendente con la configuración del intercambiador de columna recta vertical:

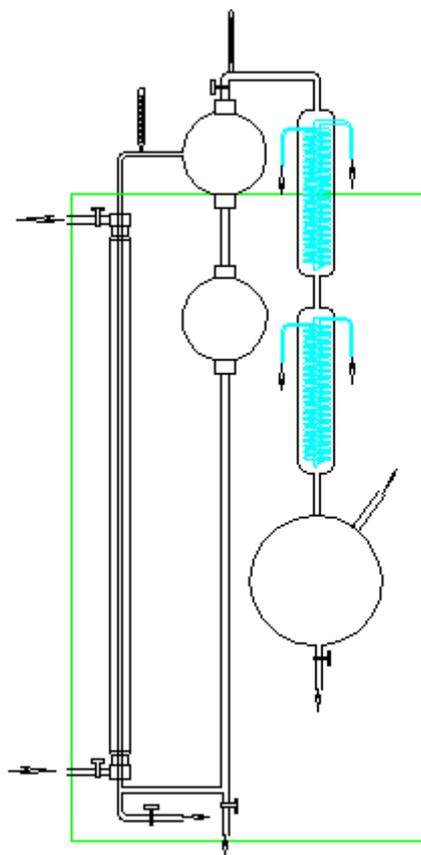


Figura 18.5.- Croquis general MEPA #1



Figura 18.6.- Vista general del MEPA #1

2.- Intercambiador de doble columna en espiral. Consistente en dos carcavas paralelas de 0,6 m de longitud y 5,5 cm de diámetro por cuyo respectivo interior discurre un tubo arrollado en espiral por el que circula el líquido alimento mientras que el líquido calefactor fluye por la carcava. Las características detalladas de este intercambiador son las siguientes:

TABLA 18.7.- Características del intercambiador de doble columna en espiral

<i>Características del intercambiador de doble columna en espiral</i>	
<i>Longitud.</i>	2 · 0,60 m
<i>Diámetro interior del tubo interior.</i>	0,3 cm
<i>Diámetro exterior del tubo interior.</i>	0,5 cm
<i>Diámetro interior tubo exterior.</i>	5,0 cm
<i>Diámetro exterior tubo exterior.</i>	5,5 cm
<i>Superficie total de contacto.</i>	0,033 m <sup>2</sup>

En las figuras 18.7 y 18.8 se muestran un croquis y una fotografía que complementan la descripción del MEPA en su configuración con el intercambiador de calor de doble columna en espiral:

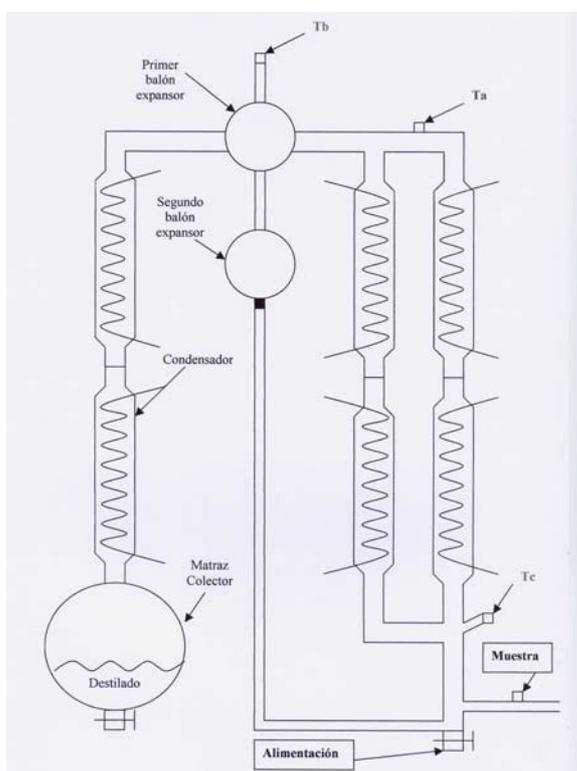


Figura 18.7.- Croquis general MEPA #2



Figura 18.8.- Vista general MEPA #2

### Matraces Expansores

A la salida del tubo evaporador, se encuentran ubicados en el MEPA diseñado, dos esferas de vidrio de unos 20 cm de diámetro encargadas de provocar una expansión en la mezcla de líquido y vapor que sale del tubo evaporador anteriormente descrito. Con la expansión provocada se facilita el cambio de estado del líquido a vapor así como la licuefacción de la salmuera por contacto con las paredes, frías, de estos dos matraces.

La salmuera concentrada en estado líquido recogida en estos matraces esféricos se recircula hacia el tubo evaporador, para repetir el proceso y concentrarla lo más posible, de forma que la eficiencia del proceso se ve sensiblemente aumentada.

### Sistema de recirculación del concentrado

Se trata de un conducto de recirculación del vapor procedente del líquido alimento y que condensa en contacto con las paredes de los matraces esféricos anteriormente citados. Este sistema recirculatorio vuelve a integrar el vapor condensado al sistema de tubos evaporadores. Este conducto de recirculación ha sido modificado insertándose en él dos

sistemas independientes de llaves que permiten la toma de muestras del líquido que se está concentrando en el interior del aparato evaporador de película ascendente sin necesidad de interrumpir el proceso evaporativo, o lo que es lo mismo, permite la toma de muestras de una forma ininterrumpida y quasi continua.



Figura 18.9.-Refrigerador en funcionamiento

### Sistema refrigerador

Un sistema refrigerador compuesto por dos serpentines refrigeradores que se encargan de condensar al final del proceso el vapor extraído del líquido alimento. Para alimentar estos serpentines refrigeradores se ha instalado una serie de tubos de silicona que transportan agua desde un grifo cercano hasta el punto de inserción del agua en los serpentines. Con la puesta en marcha de este sistema refrigerador, se logra una rápida condensación de vapor de agua extraído del alimento. Para ello se han realizado pruebas que han concluido que 350ml/min es el caudal mínimo necesario para lograr una efectiva condensación del vapor destilado.

### **Matraz colector del destilado**

Por último, en un matraz colector, se recoge el agua destilada de modo que ésta, así como el condensado del alimento que queda en el interior de los tubos evaporadores, pueda aprovecharse. Este matraz colector (foto adjunta) es un recipiente de gran capacidad y forma esférica dotado de una llave inferior para la extracción del líquido almacenado en su interior y una tapa superior modulable a la que se le conectó el sistema de vacío y la entrada del concentrado. En la fotografía se muestra el matraz colector durante uno de los ensayos realizados en el laboratorio del Grupo TECAR. En ella puede verse, además, el agua destilada obtenida que queda almacenada en el interior del mismo.



**Figura 18.10.- Matraz colector en funcionamiento**

### **18.1.- Descripción de las distintas configuraciones del MEPA #1**

---

Se han realizado ensayos con diferentes configuraciones del MEPA #1 (con intercambiador de columna recta vertical) con el objetivo fundamental de poder realizar una comparativa funcional entre las diversas posibilidades de trabajo que el Modelo de Evaporación por Película Ascendente empleado permite y determinar cuál de ellas es la más eficiente para el caso y condiciones de trabajo que se consideran en esta investigación. En la figura 18.13 se presentan las distintas configuraciones MEPA utilizadas con el intercambiador de calor de columna recta vertical.

VI.- METODOLOGÍA

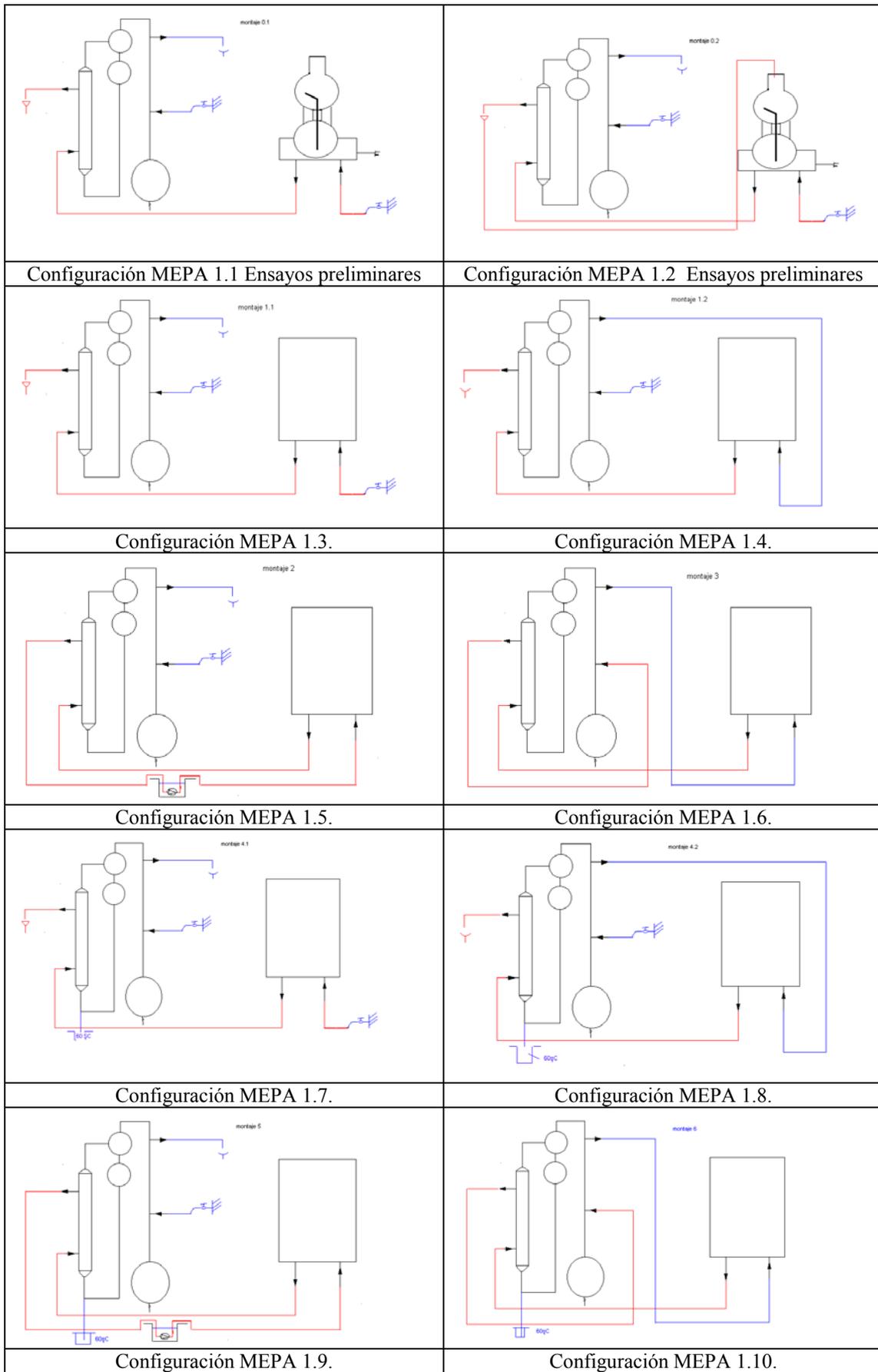


Figura 18.13.- Distintas configuraciones MEPA #1 utilizadas

Para una mejor interpretación de las configuraciones presentadas en forma de croquis en la figura 18.13, para el MEPA #1, se describen a continuación las distintas variantes de funcionamiento diseñadas, montadas y ensayadas.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.1

La configuración preliminar MEPA 1.1 se utilizó para la realización de ensayos preliminares y viene caracterizada por el empleo de un generador de vapor como fuente de aporte calórico al intercambiador de calor. El flujo de vapor generado es desechado tras su paso por el calentador. Asimismo, el caudal de refrigeración es también desechado tras su uso, no existiendo en esta configuración recirculación alguna de los flujos empleados. De este modo, el caudal de calefacción es utilizado una única vez, al igual que el caudal de refrigeración. Ambos flujos de agua pasan por el sistema y son eliminados sin recirculación alguna.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.2

Esta variación de la configuración preliminar presenta la característica distintiva de reutilizar el caudal de vapor generado, siendo reinsertado tras su uso de nuevo en el generador de vapor. En esta configuración se consigue un aprovechamiento energético del flujo térmico que en la opción anterior era eliminado. El caudal de refrigeración sigue siendo eliminado tras un único paso por el sistema mientras que el caudal de calefacción se reutiliza reinsertándose en el generador de vapor.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.3

Esta tercera configuración MEPA ensayada se caracteriza por la ausencia total de recirculación de los flujos que intervienen en el proceso. Tanto el agua de refrigeración como la utilizada para la calefacción del líquido alimento son utilizadas una única vez, siendo desechadas tras la aplicación. La diferencia principal con el montaje 1.1. es el de la utilización de un calentador convencional como instrumento para el aporte térmico al agua de calefacción, en sustitución del generador de vapor empleado en los ensayos preliminares.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.4

En esta variante de configuración, esencialmente similar a la 1.3, existe un aprovechamiento del agua de refrigeración que, una vez utilizada, es aprovechada para su utilización como agua de calefacción en el proceso de intercambio calorífico en el sistema de intercambio de calor. Así, el agua de refrigeración se introduce en el calentador, se eleva su temperatura a 65°C y se conduce al intercambiador, para ser desechada posteriormente.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.5

Esta quinta configuración MEPA presenta la particularidad de funcionar con un ciclo cerrado de calefacción, con lo que el caudal de agua caliente que se emplea en el intercambiador de calor es recirculado de nuevo al calentador, no necesitándose así aporte continuo de agua caliente. El agua de refrigeración se utiliza de manera independiente, sin recirculación alguna y es desechada tras un único paso por el sistema.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.6

La sexta configuración MEPA es singular ya que supone una modalidad de funcionamiento en ciclo completamente cerrado. Así, el agua de refrigeración, una vez utilizada, se lleva al calentador para ser empleada entonces como líquido caliente en el intercambiador de calor. A la salida de éste, el agua se conduce por un largo tubo en contacto con el aire, para que pierda de forma natural la mayor temperatura posible, y se vuelve a utilizar como agua de refrigeración, cerrándose de este modo el ciclo.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.7

Esta séptima configuración MEPA es idéntica a la 1.3 con la salvedad de utilizar ahora un recipiente calefactado para el precalentamiento del líquido alimento.

#### CONFIGURACIÓN MEPA 1.8

La variante 1.8 es idéntica a la 1.4 a excepción del uso del sistema de precalentamiento del alimento anteriormente descrito.

### CONFIGURACIÓN MEPA 1.9

La novena configuración MEPA repite la filosofía de funcionamiento de la configuración 1.5, añadiendo al sistema la particularidad del precalentamiento del líquido alimento.

### CONFIGURACIÓN MEPA 1.10

La décima y última de las configuraciones MEPA planteadas imita el funcionamiento de la configuración 3, con el sistema de precalentamiento del líquido alimento.

## **18.2.- Descripción de las distintas configuraciones del MEPA #2 utilizadas**

---

El MEPA #2 se diferencia de la primera configuración detallada líneas arriba en el tipo de intercambiador de calor utilizado. Este segundo modelo evaporador consta de una doble columna en espiral en sustitución de la columna recta del modelo anterior.

El MEPA #2 se ha hecho funcionar por recargas, es decir en funcionamiento discontinuo, y en continuo. Dentro de estas dos formas de utilización de la configuración básica del MEPA con intercambiador de doble columna en espiral, se han utilizado distintas variantes de funcionamiento que han permitido la comparación de resultados entre ellas.

Las configuraciones 2.1 y 2.2 no se muestran en la figura 18.14 debido a que no han sido ensayadas. Además, las configuraciones mostradas no se describen de manera literaria en este subapartado por tratarse, una a una, de las mismas ya descritas en el subapartado anterior, con la única excepción de utilizar un intercambiador de calor de doble columna en espiral.

VI.- METODOLOGÍA

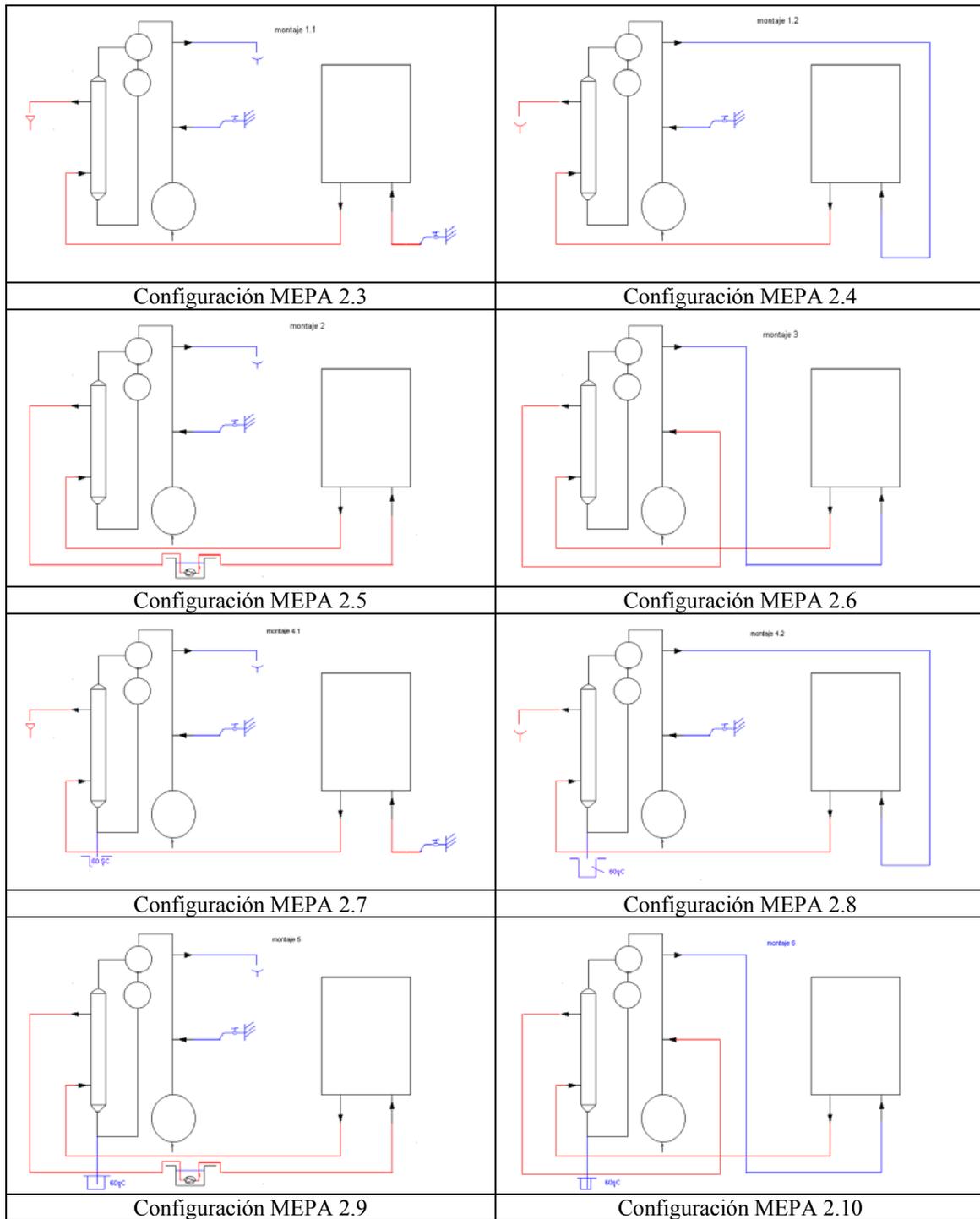


Figura 18.14.- Distintas configuraciones MEPA #2 utilizadas



## 19.- Protocolo de ensayos

---

Los diferentes grupos de ensayos que se han realizado han seguido con la mayor fidelidad posible un protocolo de ensayo previamente decidido para así lograr, por una parte, homogeneizar el proceso de los ensayos y, por otra, disponer de un “manual de instrucciones” con el que trabajar con el MEPA.

Así, el protocolo utilizado para la realización de las distintas baterías de ensayos ha sido el siguiente:

- I. En primer lugar se procede a la conexión y puesta en marcha del sistema de calefacción. Para ello, en el caso del sistema calefactor más evolucionado de los utilizados, se procede a la apertura de las llaves de entrada y salida del calentador y a la puesta en marcha de la bomba impulsora del líquido de calefacción. Se realizará también, si procede, un purgado del sistema de calefacción así como una comprobación visual de ausencia de fugas de agua en el circuito.
- II. Tras esto, se pone en funcionamiento el sistema de refrigeración. Para ello debe abrirse la llave de entrada a los serpentines refrigeradores hasta el punto indicado, de modo que el caudal de refrigeración sea el que se desea.
- III. El tercer paso consiste en la puesta en marcha del sistema generador de vacío. Debe comprobarse previamente que las llaves de control del vacío se encuentran totalmente abiertas y sólo si esto se cumple se procederá al encendido de la bomba de vacío, que con estas llaves abiertas generará tan sólo una ligera depresión en el MEPA.
- IV. A continuación se introduce el líquido alimento por la parte inferior del aparato hasta la marca que indica una carga de 500 ml en el interior del conjunto. Debe cerrarse la llave inferior de entrada de alimento al llenarse la cantidad deseada.

- V. Una vez cerrado el sistema, se aumentará el vacío generado mediante el progresivo cierre de las llaves de vacío hasta alcanzar el nivel deseado, que en los ensayos realizados ha sido de unos 60-64 cm Hg (véase apartado de resultados).
- VI. En este punto comienza el ensayo y debe tomarse nota de las condiciones y datos de inicio. Se controla el sistema hasta que se haya destilado 150 ml del alimento inicialmente introducido.
- VII. En este momento se toma una muestra del concentrado utilizando los juegos de llaves instalados a tal efecto, de modo que no es necesario interrumpir el proceso de evaporación.
- VIII. Se repone el líquido alimento en el aparato hasta volver a disponer de 500 ml de alimento en su interior. Con la muestra extraída en el punto anterior se realiza una medición de conductividad para la determinación posterior de la concentración en ese punto del ensayo.
- IX. Los puntos VI, VII y VIII se repiten cinco veces para completar un ensayo por recargas (de 5 recargas cada ensayo para dar valor estadístico a los resultados) y se toma al final los datos de hora final y tiempo utilizado en el ensayo, volumen final destilado, conductividad final de destilado, volumen final de concentrado y conductividad final de destilado.
- X. Además de todo esto, cada 5 o 10 minutos se controlan los valores de temperatura y vacío en el sistema con el objetivo de corregir posibles alteraciones de las condiciones deseadas para el ensayo. Las muestras tomadas de destilado y concentrado se analizan, etiquetan y guardan para eventuales análisis posteriores.

## 20.- Diseño experimental

Pese a que, en el ámbito general de la investigación desarrollada para la realización de la presente Tesis Doctoral, se ha trabajado por objetivos concretos (descritos en el Capítulo V), en este apartado se presenta el diseño experimental ordenado según la configuración MEPA utilizada, en aras a una mayor claridad y orden que permita una visión estructurada de los ensayos realizados.

Se presenta así el diseño de experimentos clasificándose éstos en tres bloques distintos según el siguiente esquema:

- Ensayos realizados con MEPA #1
- Ensayos realizados con un Rotovapor
- Ensayos realizados con MEPA #2

Con anterioridad a la realización de cualquier tipo de ensayo definitivo, se procedió a realizar determinadas tareas previas que colaborarían, durante el periodo de ensayos, a hacer más práctica la tarea investigadora. De entre estas tareas previas destaca especialmente la preparación de curvas de calibrado. Así, previamente a la realización sistemática de ensayos:

- Determinaciones de las curvas de calibrado correspondientes a cada uno de los compuestos que conforman las disoluciones ensayadas.

**Tabla 20.1.1.- Rango de concentraciones en la curva patrón de calibrado**

ClNa (g/l)	0-30	CuSO <sub>4</sub> (g/l)	0-5
Cl <sub>2</sub> Ca (g/l)	0-30	ZnSO <sub>4</sub> (g/l)	0-5
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (g/l)	0-30	NiSO <sub>4</sub> (g/l)	0-5
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (g/l)	0-100		

## 20.1.- Ensayos realizados con MEPA #1

- Ensayos preliminares.

Tras la instalación se realizaron diversas pruebas del sistema por partes individualizadas para su comprobación de correcto funcionamiento. Así, se realizaron pruebas al sistema de vacío, al circuito de calefacción y al sistema refrigerador, de manera independiente.

Por último se realizaron diversas pruebas preliminares a la totalidad del MEPA #1 recientemente montado y ensayado por partes, para la comprobación de su correcto funcionamiento en conjunto.

- Ensayos de determinación de la relación entre caudal de calefacción y tiempo necesario para la destilación.

**Tabla 20.1.2.- Caracterización de los ensayos caudal - tiempo**

Volumen a destilar (ml)	150
Temperatura de calefacción (°C)	80
Caudal de calefacción (l/min)	0,25; 0,45; 0,85; 1,30; 2; 2,30

- Ensayos por incrementos en intercambiador de columna recta vertical con NaCl con y sin precalentamiento previo del alimento a distintas temperaturas y concentraciones de partida.

**Tabla 20.1.3.- Caracterización de los ensayos con NaCl sin precalentamiento del alimento**

Concentraciones (g/l)	5; 10; 20; 30
Temperaturas (°C)	80
Vacío (cm Hg)	60-62

**Tabla 20.1.4.- Caracterización de los ensayos con NaCl con precalentamiento del alimento**

Concentraciones (g/l)	5; 10; 20; 30
Temperaturas (°C)	80
Vacío (cm Hg)	60-62

- Ensayos por recargas con disoluciones de  $\text{CuSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical.

Tabla 20.1.5.- Caracterización de los ensayos con  $\text{CuSO}_4$  y columna recta

Concentraciones (g/l)	0,5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de  $\text{ZnSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical.

Tabla 20.1.6.- Caracterización de los ensayos con  $\text{ZnSO}_4$  y columna recta

Concentraciones (g/l)	0,5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de  $\text{NiSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical.

Tabla 20.1.7.- Caracterización de los ensayos con  $\text{NiSO}_4$  y columna recta

Concentraciones (g/l)	0,5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  en intercambiador de columna recta vertical.

Tabla 20.1.8.- Caracterización de los ensayos con  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  y columna recta

Concentraciones (g/l)	2; 5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con distintas concentraciones de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  en intercambiador de columna recta vertical a distintas temperaturas de calefacción.

**Tabla 20.1.9.- Caracterización de los ensayos con  $K_2Cr_2O_7$  en columna recta a distintas temperaturas de calefacción**

Concentraciones (g/l)	15; 77; 154; 200; 308
Temperaturas (°C)	85; 90
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de NaCl en intercambiador de columna recta vertical hasta alcanzar una concentración de 30g/l.

**Tabla 20.1.10.- Caracterización de los ensayos con NaCl en columna recta**

Concentraciones (g/l)	3; 9; 15,7; 21,5; 5
Temperaturas (°C)	85
Vacío (cm Hg)	60-64

## 20.2.- Ensayos realizados con un Rotovapor

- Ensayos monoetapa con un rotavapor a diferentes temperaturas de calefacción y concentraciones de NaCl de partida

**Tabla 20.2.1.- Caracterización de los ensayos de disoluciones de NaCl con rotavapor**

Concentraciones (g/l)	1; 5; 10; 20
Temperaturas (°C)	80; 85; 90
Vacío (cm Hg)	30; 35; 40; 45; 50; 55

## 20.3.- Ensayos realizados con MEPA #2

- Ensayos con agua destilada a distintas temperaturas en intercambiador de doble columna en espiral.

**Tabla 20.3.1.- Caracterización de los ensayos con agua destilada**

Concentraciones (g/l)	0
Temperaturas (°C)	75; 80; 90
Vacío (cm Hg)	60

- Ensayos por incrementos con disoluciones de NaCl en intercambiador de doble columna en espiral con distintas configuraciones del aparato evaporador.

Tabla 20.3.2.- Caracterización de los ensayos por incrementos con NaCl y distintas configuraciones del aparato evaporador

Concentraciones (g/l)	10
Temperaturas (°C)	50
Vacío (cm Hg)	60

- Ensayos en continuo con disoluciones de NaCl en intercambiador de doble columna en espiral con distintas configuraciones del aparato evaporador.

Tabla 20.3.3.- Caracterización de los ensayos en continuo con NaCl y distintas configuraciones del aparato evaporador

Concentraciones (g/l)	10
Temperaturas (°C)	50
Vacío (cm Hg)	60

- Ensayo de recuerdos con agua destilada en intercambiador de doble columna en espiral a 85°C de temperatura de calefacción y 60 cm Hg de vacío.

Este ensayo de recuerdos tiene por objetivo comprobar que no existen desviaciones en las determinaciones de conductividad del destilado y del concentrado en los ensayos debidos a residuos de ensayos anteriores.

Tabla 20.3.4.- Caracterización de los ensayos con agua destilada para la comprobación de recuerdos con intercambiador de doble columna en espiral

Concentraciones (g/l)	0
Temperaturas (°C)	85
Vacío (cm Hg)	60

- Ensayos por recargas con disoluciones de CuSO<sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral.

Tabla 20.3.5.- Caracterización de los ensayos con CuSO<sub>4</sub> y doble columna en espiral

Concentraciones (g/l)	0,5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones con  $ZnSO_4$  en intercambiador de doble columna en espiral.

Tabla 20.3.6.- Caracterización de los ensayos con  $ZnSO_4$  y doble columna en espiral

Concentraciones (g/l)	0,5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de  $NiSO_4$  en intercambiador de doble columna en espiral.

Tabla 20.3.7.- Caracterización de los ensayos con  $NiSO_4$  y doble columna en espiral

Concentraciones (g/l)	0,5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de  $K_2Cr_2O_7$  en intercambiador de doble columna en espiral.

Tabla 20.3.8.- Caracterización de los ensayos con  $K_2Cr_2O_7$  y doble columna en espiral

Concentraciones (g/l)	2; 5
Temperaturas (°C)	65
Vacío (cm Hg)	62-64

- Ensayos con disoluciones de  $CaCl_2$  en intercambiador de doble columna en espiral hasta alcanzar una concentración de 30g/l

Tabla 20.3.9.- Caracterización de los ensayos con  $CaCl_2$  y doble columna en espiral

Concentraciones (g/l)	5
Temperaturas (°C)	85
Vacío (cm Hg)	62-64

## 21.- Métodos analíticos

La metodología analítica fundamental utilizada en el desarrollo de la presente Tesis Doctoral ha sido la realización de determinaciones conductimétricas. Para ello, se ha empleado el conductímetro CRISON GLP 31, que tiene las siguientes características básicas:

**Determinaciones:** Conductividad por estabilidad, en continuo, y sólidos totales disueltos.

- **Rango de T<sup>a</sup>:** De -10 a 110 °C con un error de medida de  $\leq 0,3$  % (+1 dígito).

- **Rango de K:**  $\pm 0,1$  % ( $\pm 1$  dígito) con un error de medida de  $\leq 0,5$  % (+1 dígito).



Figura 21.1.- Conductímetro CRISON GLP 31 y sonda.  
Labs. TECAR

Para las determinaciones conductimétricas se siguió el protocolo que se muestra a continuación:

1. Se procede al encendido del aparato CRISON GLP 31.
2. Se introduce la sonda para determinación de conductividades en una muestra del líquido del cual se quiere conocer su conductividad.
3. Se espera a que la lectura se estabilice en la pantalla (hasta que ésta se muestre en manera continua, no intermitente).
4. Se anota o almacena en la memoria el valor de conductividad mostrado.
5. Se retira la sonda para determinación de conductividades y se lava con agua destilada.

Por último, para conocer la relación existente entre conductividad y concentración de los distintos compuestos químicos empleados en los ensayos realizados, se utilizaron las correspondientes curvas de calibrado (véase figura 23.3.1). Las muestras ensayadas y analizadas se guardaron para eventuales análisis posteriores.

### **Material de laboratorio utilizado e instrumental**

Además de lo descrito líneas arriba, ha sido necesaria también la utilización de diversos utensilios y aparatos de laboratorio para la realización de los ensayos, así como de las medidas y determinaciones necesarias para la correcta caracterización y control de los mismos. Así, se han utilizado también:

- Probetas
- Pipetas
- Agitador magnético
- Embudo de vidrio
- Vasos de precipitados
- Matraces Erlenmeyer
- Tubos de silicona
- Tubos de ensayo
- Termómetros
- Vacuómetro



**Figura 21.2.-Tubos de ensayo con muestras de  $\text{Cu SO}_4$ . Labs. TECAR**

## RESULTADOS EXPERIMENTALES ORDENADOS POR OBJETIVOS Y DISCUSIÓN VII

---

22. Resultados para objetivo nº1	113
23. Resultados para objetivo nº2	115
24. Resultados para objetivo nº3	123
25. Resultados para objetivo nº4	141
26. Análisis crítico de los resultados de los ensayos: comparativas y discusión	145



## 22.- Resultados para objetivo nº1

---

El primer objetivo que se persigue con la investigación realizada es el de “Diseñar y poner en marcha distintas configuraciones de un Modelo de Evaporación por Película Ascendente (MEPA)”. Para la satisfacción de este primer objetivo se realizaron pruebas de los diversos sistemas que componen el MEPA por separado y, tras éstas, de manera conjunta, tal como se detalla a continuación:

Las pruebas preliminares de funcionamiento del sistema de generación de vacío dieron como resultado el correcto funcionamiento del citado sistema en el rango de vacío de 55-64 cm Hg. Siendo imposible trabajar a presiones de vacío inferiores a 55 cmHg porque la evaporación se realiza con dificultad en el rango de temperaturas ensayadas. No se ha trabajado por encima de 64cm Hg por compromiso con los objetivos y justificación descritos, ya que se persigue la comprobación del sistema en las condiciones más desfavorables de funcionamiento. Mayores presiones de vacío generarán condiciones más favorables a la evaporación.

Por otra parte, las pruebas y ensayos previos del sistema de transmisión de calor dieron resultados positivos puesto que se pudo comprobar la bondad del sistema ideado para la transmisión de calor y la recirculación del líquido calefactor, siendo las temperaturas de trabajo más usuales las comprendidas entre 55°C y 90°C

Tras esto, las pruebas del sistema de refrigeración demostraron la validez del mismo para realizar la condensación del vapor generado en los ensayos preliminares, por lo que se dio por válido el sistema de refrigeración previsto compuesto por dos refrigeradores de doble camisa y serpentín dispuestos en serie. El caudal que se estableció como idóneo para la refrigeración en las condiciones y funcionamiento de la configuración MEPA ensayada fue de 0,350 l/min.

**Tabla 22.1.1.- Rango de valores ensayados en las pruebas preliminares de funcionamiento**

Vacío suministrado (cm Hg)	55 a 64
Caudal de refrigeración (l/min)	0,350
Temperatura del líquido de calefacción (°C)	55 a 90
Caudal del líquido de calefacción (l/min)	0,75 - 3

Por último, y como resultado de las pruebas y ensayos previos del conjunto global del Modelo Evaporador de Película Ascendente, se determinó que el conjunto MEPA diseñado y montado era adecuado para la realización de las tareas de laboratorio necesarias para el desarrollo de la investigación prevista, teniéndose por válidos los rangos de funcionamiento mostrados en la tabla 21.1.1.

## 23.- Resultados para objetivo n°2

Se presentan en este punto los resultados más destacables de los ensayos para la satisfacción del objetivo n°2 relativo a la definición de las variables termohidráulicas que intervienen en el proceso evaporador y algunos comentarios que se ha considerado oportuno realizar para que sirvan de enlace entre éstos y las conclusiones que de ellos se presentarán en apartados posteriores.

### 23.1.- Ensayos de determinación de la relación entre caudal de calefacción y tiempo necesario para la destilación

De las tres pruebas previas y ensayos realizados se presenta en la figura 23.1.1, a modo de síntesis, la representación gráfica de los resultados obtenidos del estudio de la relación entre caudal de calefacción y tiempo medio de duración del ensayo para la evaporación de 150 ml de agua, a 80°C, caudal de calefacción de 0,75 l/min y un vacío promedio de 60 cm Hg realizado con un MEPA #1 en su configuración básica.

También se presenta, en la figura 23.1.2, la evolución de las temperaturas de control “A” y “B”, temperaturas de la mezcla líquido-vapor y del vapor respectivamente (véase glosario de términos) en función a la variación del caudal generada en estos ensayos, en las mismas tres pruebas realizadas citadas líneas arriba.

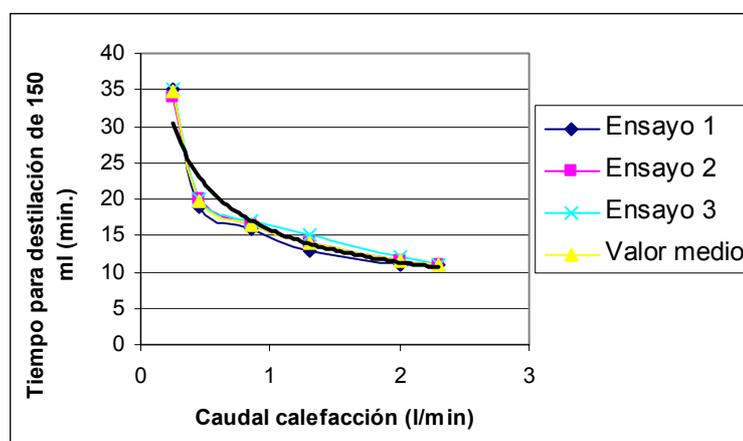


Figura 23.1.1.- Tiempo de duración del proceso de destilación de 150 ml de agua en función del caudal de calefacción a 80°C, 0,75 l/min y 60 cm Hg

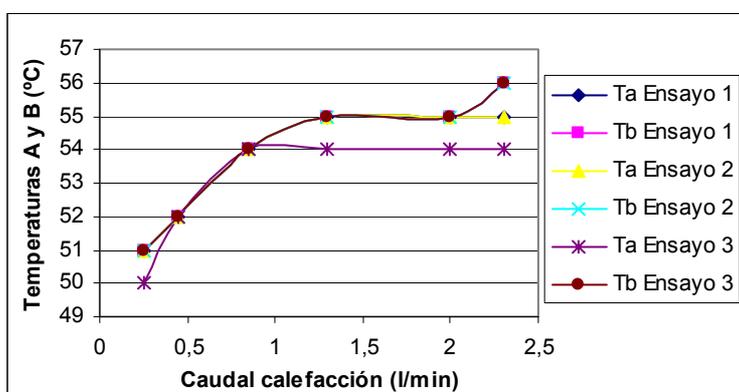


Figura 23.1.2.- Evolución de las temperaturas “A” y “B” de control según el caudal de calefacción, a 80°C y 60 cm Hg

De los resultados de estos ensayos se observa tendencia a la estabilización de la duración del período de evaporación a 10 minutos conforme el caudal de calefacción va incrementándose en condiciones estables de 80°C y 60cm Hg para todos los ensayos. También puede observarse la evolución de las temperaturas de control “A” y “B” respecto al caudal de calefacción de los ensayos, que también aumentan, hasta tender a estabilizarse en valores en torno a 55 -56°C para ambas temperaturas.

### 23.2.- Ensayos monoetapa con un rotavapor a diferentes temperaturas de calefacción y concentraciones de partida

Los ensayos realizados con un rotavapor se basaron en la combinación de distintas condiciones de funcionamiento, entre las que se variaron la concentración inicial de NaCl, la temperatura del baño termostático y el vacío ejercido sobre el sistema.

Se ha trabajado con disoluciones de NaCl porque se ha considerado, a lo largo de todo el trabajo investigador, a estas disoluciones como patrón o de referencia en relación a las disoluciones de compuestos metálicos ensayadas más adelante, ya en las configuraciones MEPA diseñadas.

De los ensayos realizados con el rotavapor se presenta tan sólo una muestra en las figuras 23.2.1 y 23.2.2. En ellas se observa la evolución de la temperatura del vapor, el volumen destilado obtenido tras cada ensayo y la conductividad de dicho destilado.

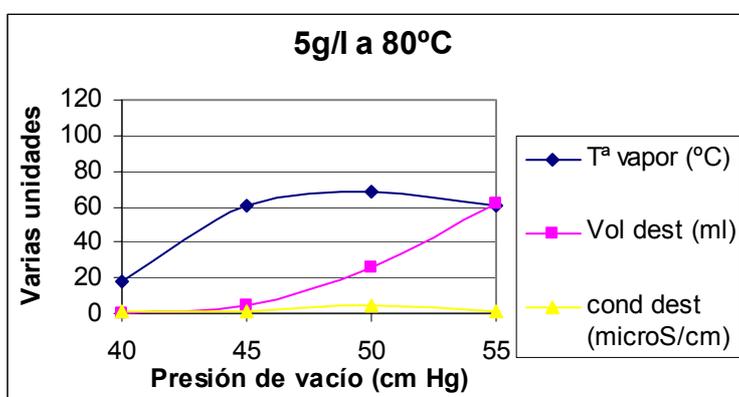


Figura 23.2.1.- Resultados de los ensayos de destilación con rotavapor de una disolución de NaCl de 5g/l en distintas condiciones de presión y 80°C de temperatura de calefacción

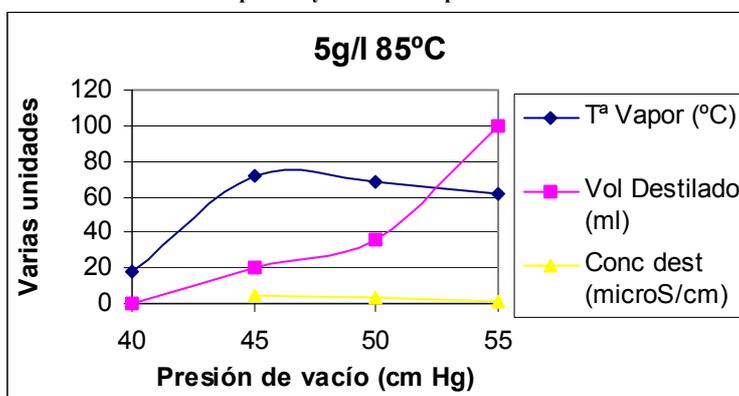


Figura 23.2.2.- Resultados de los ensayos de destilación con rotavapor de una disolución de NaCl de 5g/l en distintas condiciones de presión y 85°C de temperatura de calefacción

Puede observarse, de los resultados de estos ensayos, que en este tipo de operaciones de separación, el destilado que se obtiene es altamente puro, teniéndose valores de conductividad en torno a los 2-3  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . También es destacable la clara tendencia a la disminución de la temperatura del vapor obtenido con el aumento del vacío ejercido en el sistema, así como el aumento no lineal del volumen de líquido destilado con el aumento del vacío en el proceso.

### 23.3.- Ensayos por incrementos en intercambiador de tubo recto con NaCl con y sin precalentamiento previo del alimento a distintas temperaturas y concentraciones de partida

De las tres series de ensayos realizadas con el intercambiador de columna recta trabajando con disoluciones de NaCl a concentraciones de 5, 10, 20 y 30 g/l, con y sin precalentamiento previo del alimento a 73°C, se presentan las figuras 23.3.1, que representa los resultados de los ensayos a concentración 10g/l, 23.3.2 y 23.3.3, a modo de síntesis de los resultados obtenidos en estas series:

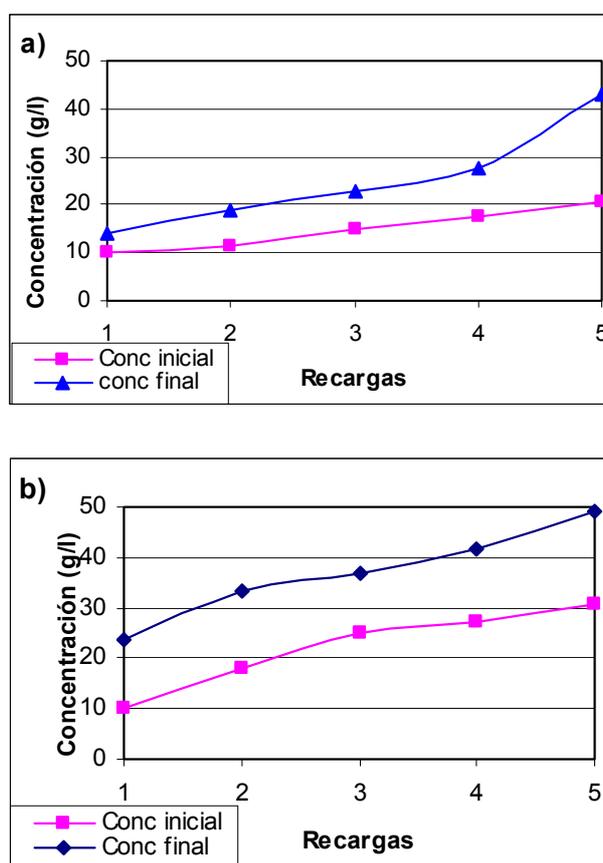


Figura 23.3.1.- Variación de la concentración del líquido alimento (concentrado) al inicio y final de cada recarga con intercambiador de columna simple y disolución de 10 g/l NaCl a 80°C y 60 cm Hg. a) sin precalentamiento; b) con precalentamiento

La figura 23.3.2. muestra la evolución de los valores medios de concentración de NaCl en el destilado, para cada una de las concentraciones iniciales de NaCl con que se ha

trabajado como disolución alimento. Se observa la tendencia al aumento de la concentración en el destilado conforme aumenta la concentración del alimento.

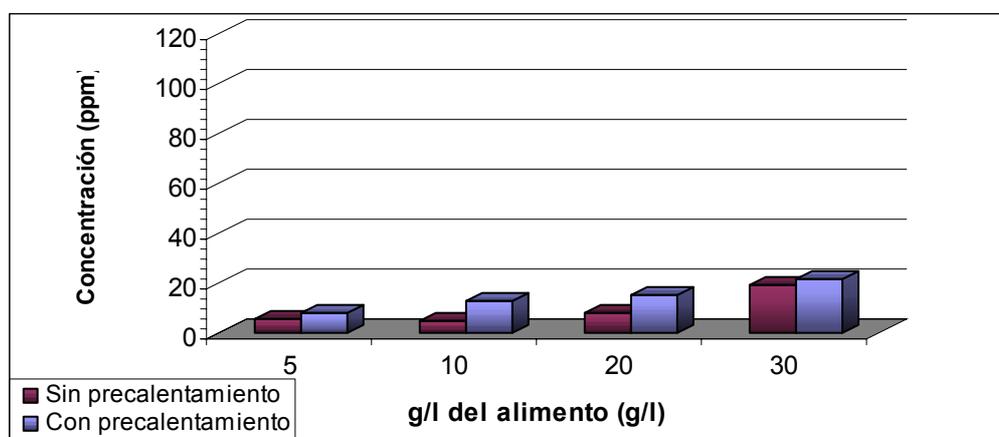


Figura 23.3.2.- Valores medios de concentración de NaCl en destilado para ensayos a 80°C y 60 cm Hg en función a la concentración inicial de la disolución alimento

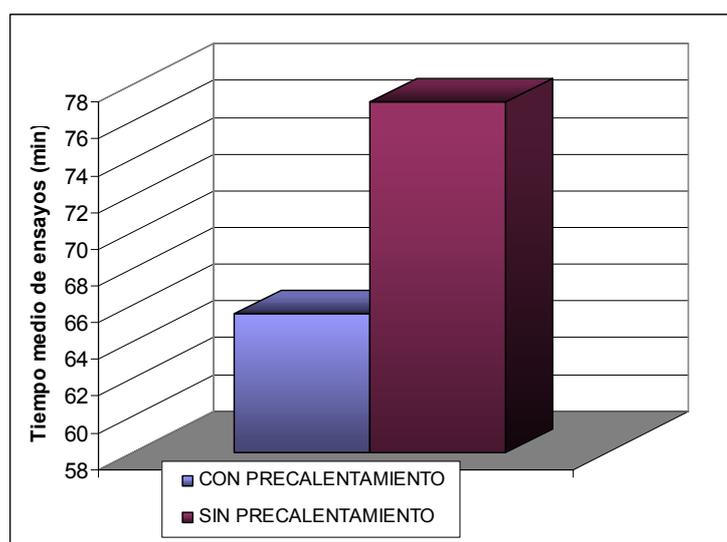


Figura 23.3.3.- Tiempo medio de duración de ensayos de 5 recargas con disoluciones de entre 5 y 30 g/l a 80°C y 60cm Hg con y sin precalentamiento

Puede observarse en estas gráficas la evolución de las concentraciones y conductividad de los líquidos en el proceso de separación así como la apreciable diferencia entre ensayos realizados con y sin precalentamiento en cuanto a duración total de los ensayos. Por el contrario no se observan diferencias significativas en los demás parámetros controlados en los ensayos.

### 23.4.- Ensayos con agua destilada a distintas temperaturas en intercambiador de doble columna en espiral

De los diversos ensayos realizados con agua destilada, con temperaturas de 75 a 90°C del caudal de calefacción y a 60cm Hg de vacío suministrado al sistema, se presentan sintetizadamente los siguientes resultados de caudal destilado medio generado.

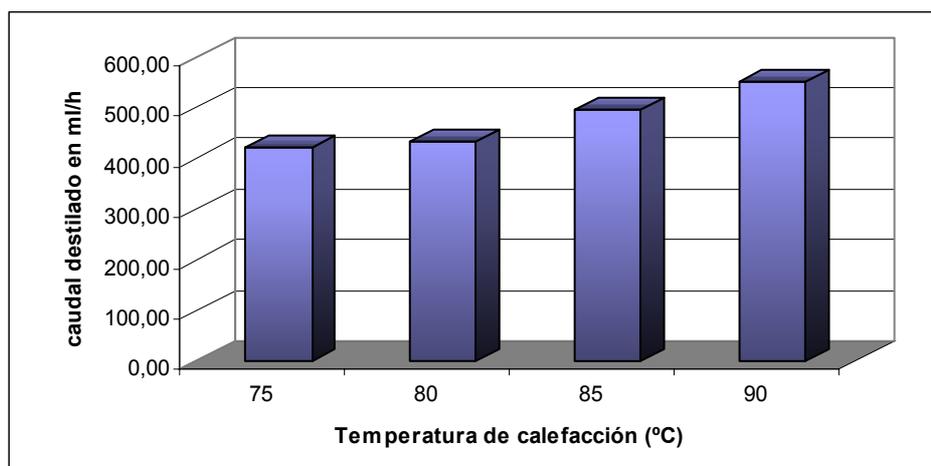


Figura 23.4.1.- Caudales en ensayos con doble columna espiral a distintas temperaturas de calefacción, 60 cm Hg y caudal de agua caliente de 0,75 l/min

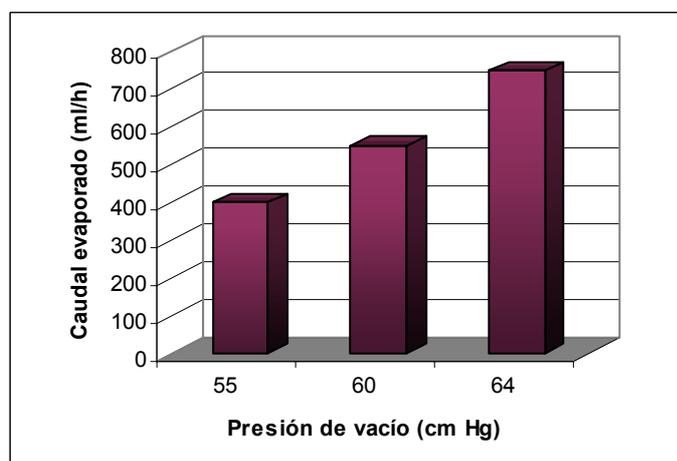


Figura 23.4.2.- Caudales en ensayos con doble columna espiral a distintas presiones de vacío y caudal de agua caliente de 3 l/min a 65°C

De estos ensayos puede extraerse, a modo de observación generalista sobre los mismos, que existe una notable diferencia entre los caudales de destilado obtenidos en función al flujo de líquido calefactor que se hace pasar por el intercambiador de calor.

Asimismo, existe, como era de esperar, un incremento no lineal del caudal destilado obtenido conforme las condiciones para la evaporación del agua se hacen más favorables dentro del sistema.

Los caudales obtenidos de los ensayos realizados que se muestran en la figura 23.4.1 varían, según la temperatura del líquido de calefacción, entre 420ml/h y 555 ml/h para el caso de trabajar con un caudal de agua caliente de 0,75 l/min.

Por otra parte, los ensayos realizados que se muestran en la figura 23.4.2, se han realizado a temperatura de calefacción estable de 65°C y un caudal del líquido térmico de 3 l/min, que han dado como resultado valores de caudal destilado que varían entre 400ml/h y 750ml/h.

## 24.- Resultados para objetivo n°3

En el presente apartado se muestran los resultados más destacables de los ensayos realizados para satisfacer el objetivo n°3 referente a la determinación de la calidad del destilado y del concentrado obtenidos con las distintas configuraciones MEPA ensayadas.

### 24.1.- Determinaciones de las curvas de calibrado correspondientes a cada uno de los compuestos que conforman las disoluciones ensayadas

De las pruebas y determinaciones realizadas para la obtención de las curvas de calibrado de los compuestos ensayados se presenta, en la figura 21.3.1, la representación gráfica de las mismas.

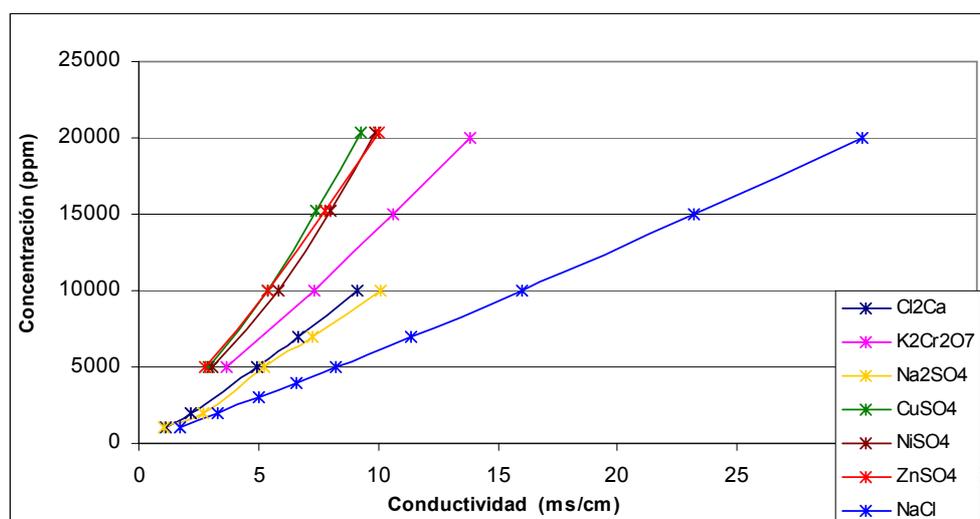


Figura 24.1.1.- Curvas de calibrado

### Ensayos con NaCl

### 24.2.- Determinaciones por recargas con disoluciones de NaCl en intercambiador de doble columna en espiral con distintas configuraciones del aparato evaporador

Se presenta a continuación una síntesis de los resultados obtenidos en los ensayos realizados con distintas configuraciones del aparato evaporador, en la base de la

utilización de un intercambiador de calor de doble columna en espiral (MEPA #2), con disoluciones de NaCl. La correspondencia y disposición de cada una de las configuraciones utilizadas puede verse en los croquis que se presentan en el Capítulo VI.

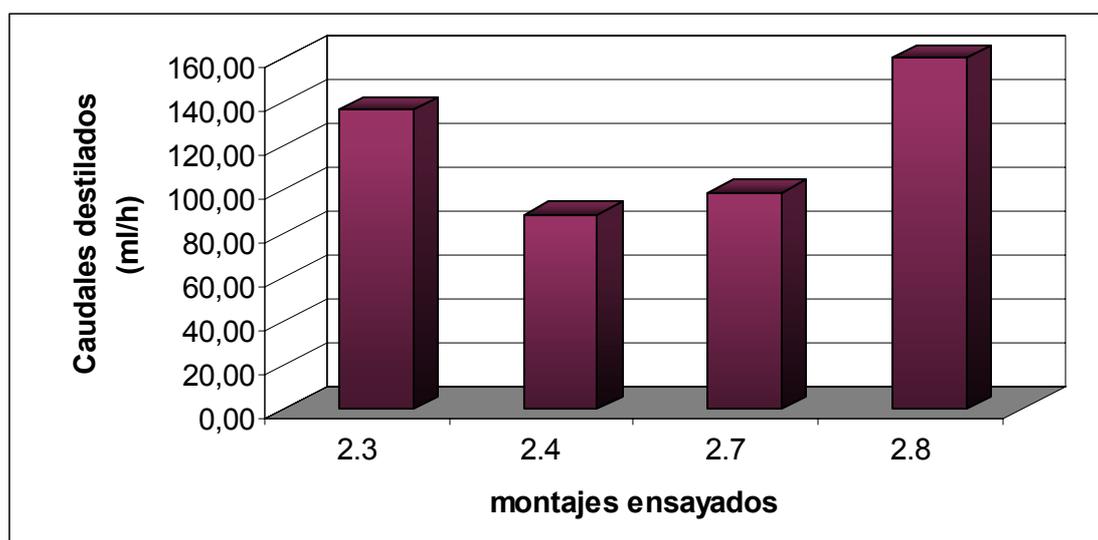


Figura 24.2.1.- Caudales del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando por recargas a 50°C y 63-64 cm Hg

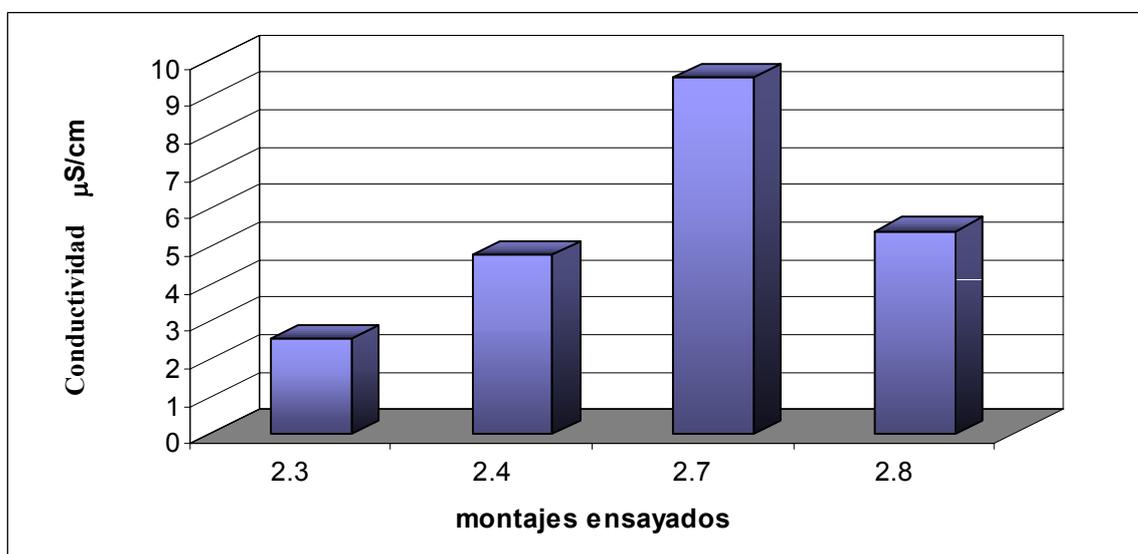


Figura 24.2.2.- Conductividades del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando por recargas a 50°C y 63-64 cm Hg

De estos ensayos se deduce que el montaje 2.8. es el más eficiente, tratándose éste de una configuración MEPA #2 en el que el agua de refrigeración, que sale algo caliente una vez ha pasado por el serpentín en el que absorbe calor del destilado que condensa, es reintroducido en el sistema de calentamiento del agua para la calefacción del

intercambiador de calor. Esta configuración permite un precalentamiento del agua de calefacción muy interesante y que ha permitido una sensible mejoría en cuanto a caudal destilado obtenido sin menoscabo de la calidad y pureza de dicho destilado.

### 24.3.- Determinaciones en continuo con disoluciones de NaCl en intercambiador de doble columna en espiral con distintas configuraciones del aparato evaporador

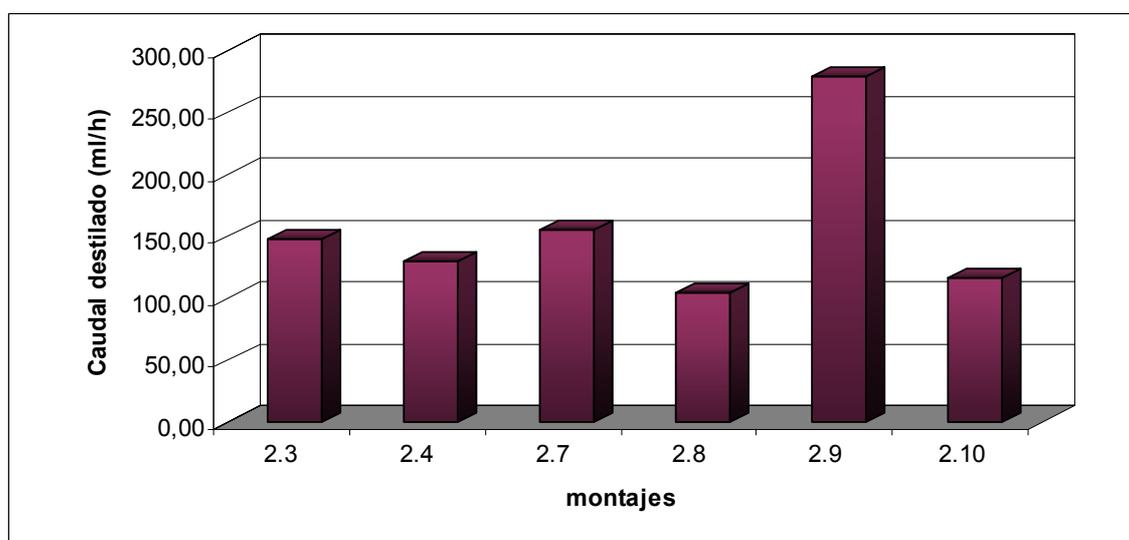


Figura 24.3.1.- Caudales del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando en continuo a 50°C y 63-64 cm Hg

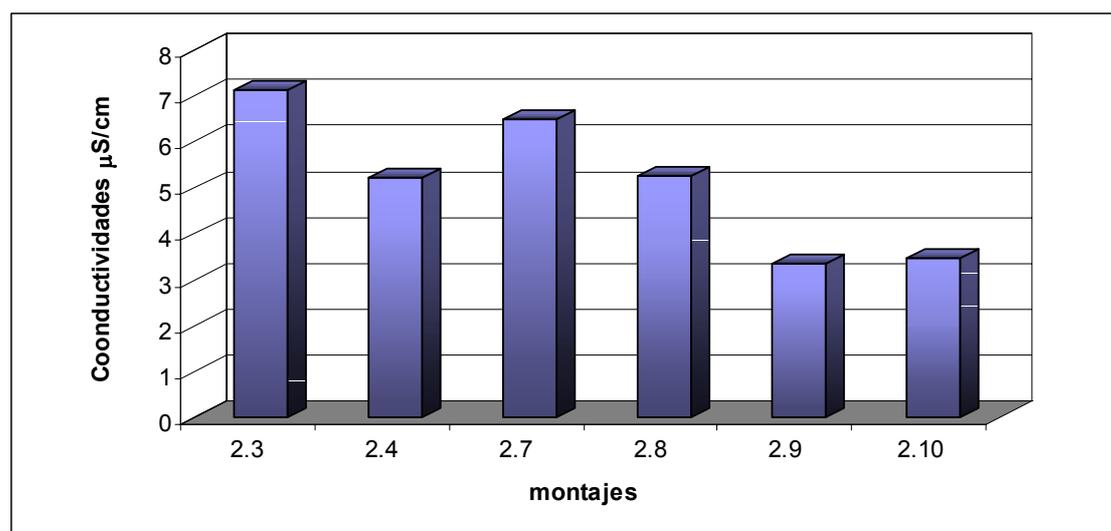


Figura 24.3.2.- Conductividades del destilado obtenido en distintas disposiciones del aparato evaporador con intercambiador de doble columna en espiral funcionando en continuo a 50°C y 63-64 cm Hg

De los ensayos realizados se deduce que, con clara diferencia, es la configuración 2.9 la más eficiente, tratándose ésta de una circulación cerrada del líquido calefactor que, tras pasar por el intercambiador vuelve a introducirse en el calentador, funcionando el sistema refrigerador de manera completamente independiente.

#### 24.4.- Ensayo de recuerdos con agua destilada en intercambiador de doble columna en espiral a 85°C de temperatura de calefacción y 60 cm Hg

Tras diversas pruebas y ensayos con disoluciones de NaCl se realizó la prueba de recuerdos consistente en hacer funcionar el sistema con agua destilada como líquido alimento para así determinar si existe inercia en los resultados de conductividad del destilado de unos ensayos a otros. Los resultados obtenidos son los que se muestran en la figura 23.4.1.

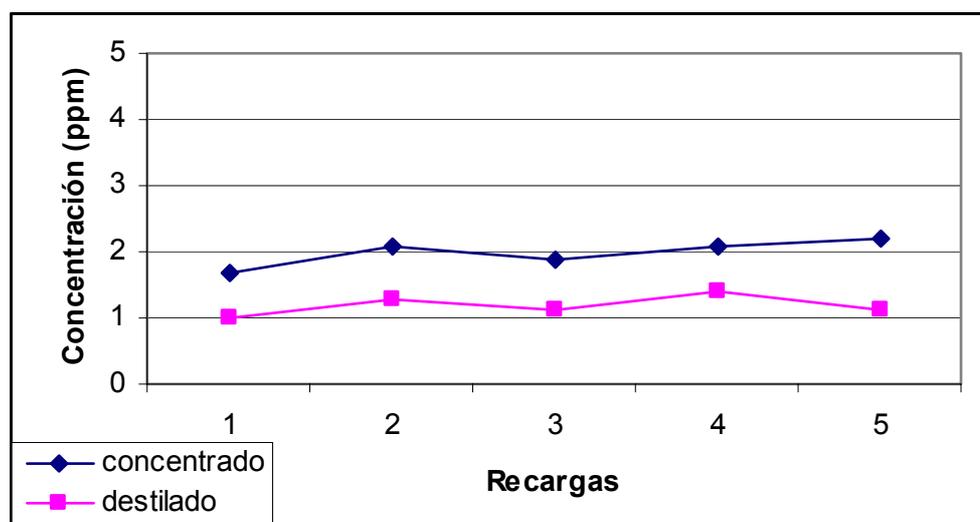


Figura 24.4.1.- Concentración de NaCl en el destilado y en el líquido problema derivada de la existencia de recuerdos de ensayos anteriores

De los resultados que se observan puede deducirse con facilidad que el recuerdo en las concentraciones del destilado y del líquido problema es inexistente o muy reducido debido a que a penas se ha detectado conductividad en el ensayo de recuerdo realizado con agua destilada para tal fin.

## Ensayos con CuSO<sub>4</sub>

### 24.5.- Ensayos por recargas con disoluciones de CuSO<sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical

De los ensayos realizados por recargas con disoluciones de CuSO<sub>4</sub> en distintas concentraciones, empleando para ello el intercambiador de columna recta, se presenta, en primer lugar, los resultados correspondientes a la evolución y relación entre temperaturas de mezcla y vapor saliente del intercambiador con el vacío suministrado al sistema. Estos resultados son los obtenidos de cinco series de ensayos distintas enumeradas desde la 1.1 hasta la 1.5, como se muestra en las figuras:

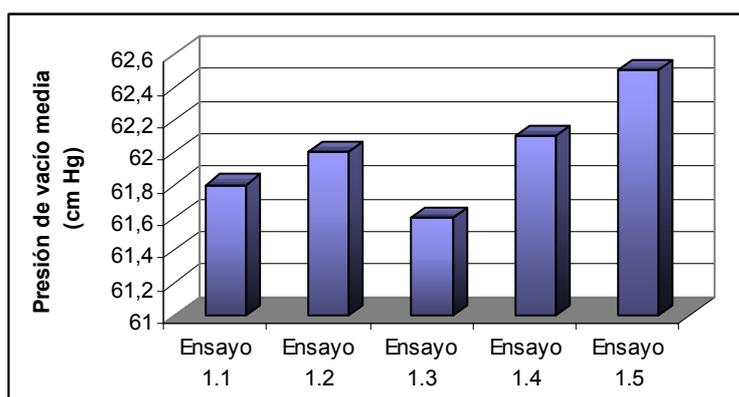


Figura 24.5.1.- Evolución de la depresión media en cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO<sub>4</sub> en el intercambiador de columna recta vertical

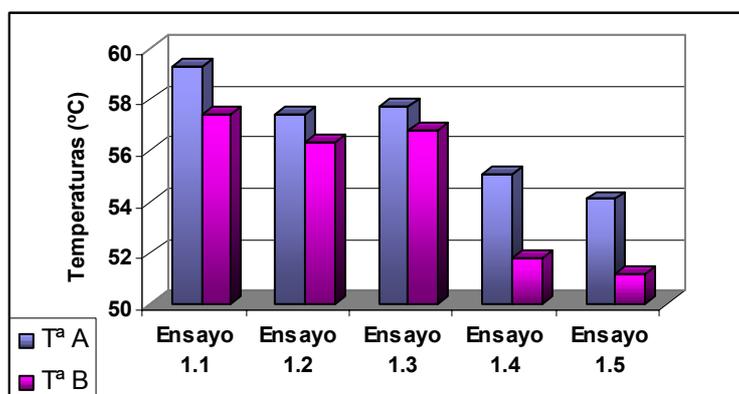


Figura 24.5.2.- Evolución de las temperaturas de volatilización de cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO<sub>4</sub> en el intercambiador de columna recta vertical

Puede observarse, en las figuras 24.5.1 y 24.5.2, que existe una relación inversa entre la depresión ejercida sobre el interior del sistema y la temperatura a la cual ocurre el fenómeno de volatilización en el intercambiador de calor.

En las figuras 24.5.3 y 24.5.4 se muestran las gráficas relativas a las conductividades del líquido concentrado y los volúmenes de destilado obtenido en estos ensayos:

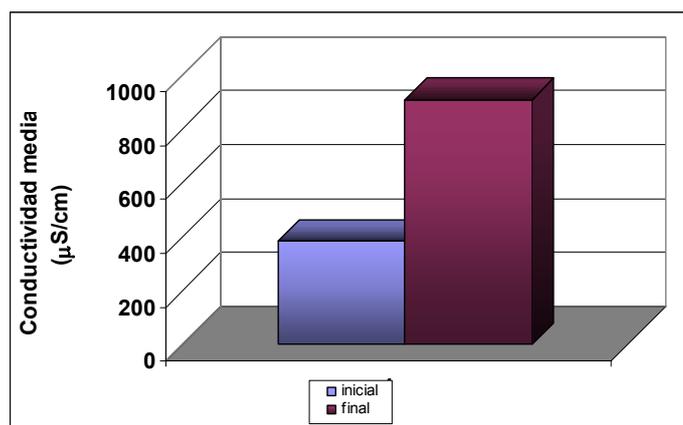


Figura 24.5.3.- Conductividad media inicial y final del concentrado en ensayos con disoluciones de 0,5 g/l de  $\text{CuSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical

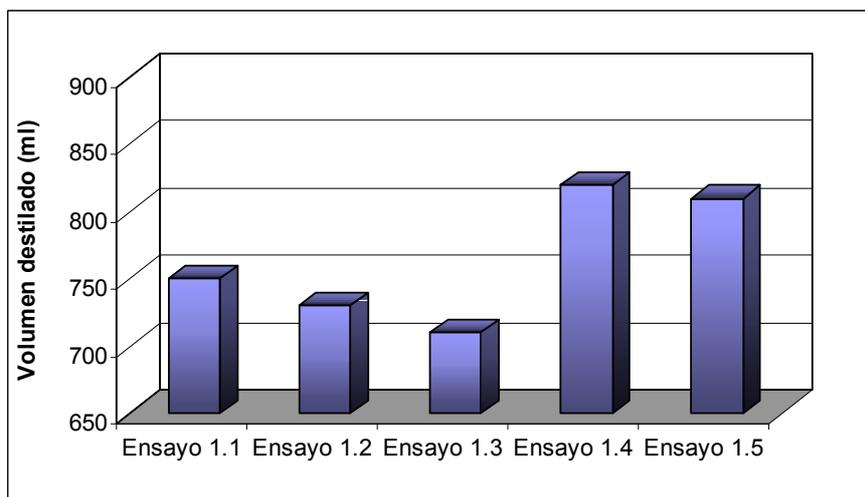


Figura 24.5.4.- Volúmenes destilados en ensayos con  $\text{CuSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical

La representación gráfica mostrada en la figura 24.5.4 puede relacionarse fácilmente con los valores mostrados en las representaciones gráficas de las figuras 24.5.1 y 25.4.2 y de la comparación de estas figuras se puede observar que existe una relación inversa entre vacío ejercido en el sistema y temperaturas de volatilización. Puede observarse

que existe también una relación inversa entre el volumen destilado y la presión de vacío ejercida en el sistema.

### 24.6.- Ensayos por recargas con disoluciones de $\text{CuSO}_4$ en intercambiador de doble columna en espiral

De los resultados obtenidos en los ensayos que se describen se presentan a continuación los relativos al vacío suministrado y su relación inversa con la temperatura de volatilización en el intercambiador, así como las conductividades del líquido en el intercambiador y los volúmenes de destilado obtenidos.

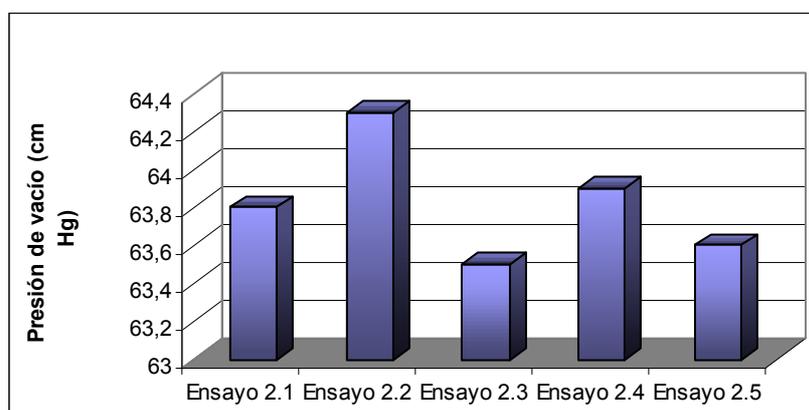


Figura 24.6.1.- Evolución de la depresión media en cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de  $\text{CuSO}_4$  en el intercambiador de doble columna en espiral

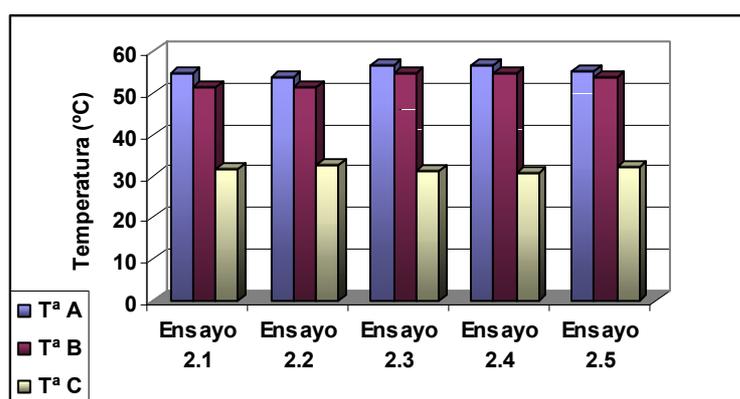


Figura 24.6.2.- Evolución de las temperaturas medias en cada ensayo con disoluciones de 0,5 g/l de  $\text{CuSO}_4$  en el intercambiador de doble columna en espiral

Se presenta en las figuras 24.6.3 y 24.6.4 la representación gráfica de los resultados de los ensayos realizados en intercambiador de doble columna en espiral para la medición de conductividades y volúmenes de destilado en ellos obtenidos:

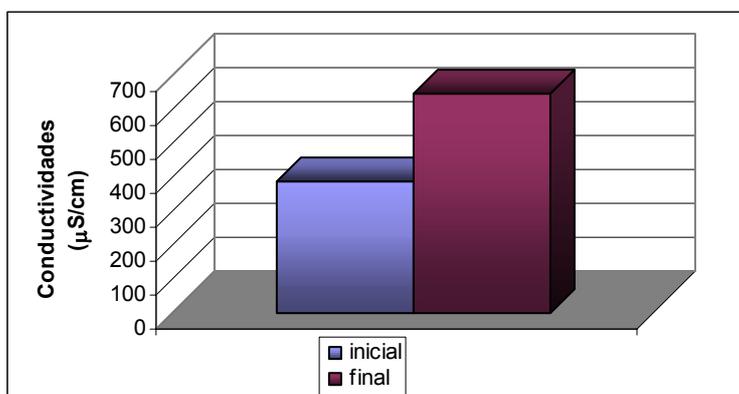


Figura 24.6.3.- Conductividades del concentrado en ensayos con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO<sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral

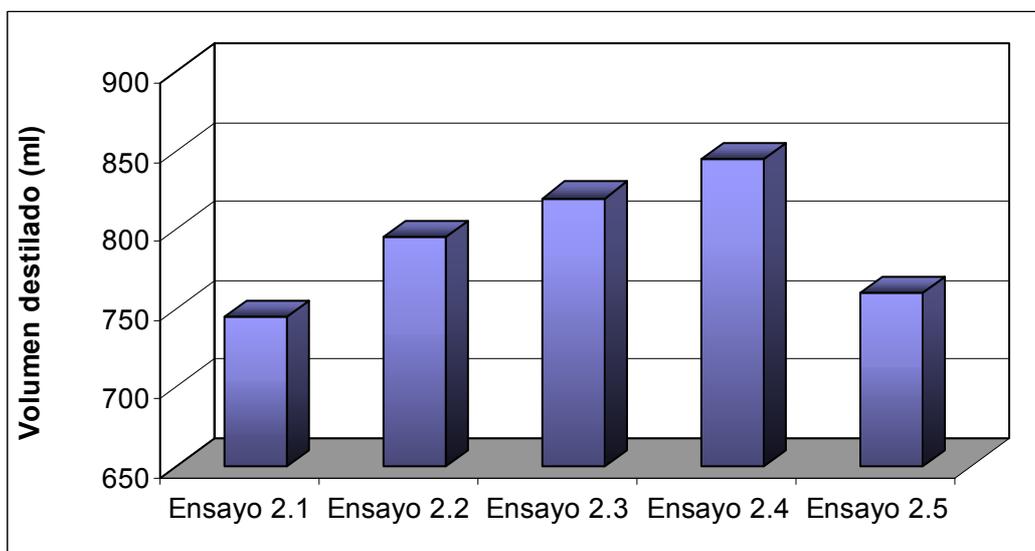


Figura 24.6.4.- Volúmenes destilados en ensayos con disoluciones de 0,5 g/l de CuSO<sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral

## Ensayos con ZnSO<sub>4</sub>

### 24.7.- Ensayos por recargas con disoluciones de ZnSO<sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical

Se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados con ZnSO<sub>4</sub> en intercambiador de columna recta en espiral, para la determinación de las conductividades iniciales y finales de cada muestra ensayada:

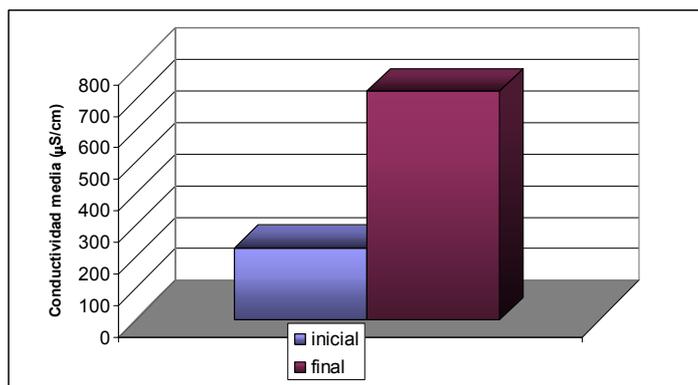


Figura 24.7.1.- Conductividades medias del líquido alimento al inicio y final de los ensayo con ZnSO<sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical

Se presentan también los resultados de caudales y conductividades de destilado obtenidos en cada uno de los ensayos realizados con esta sal metálica:

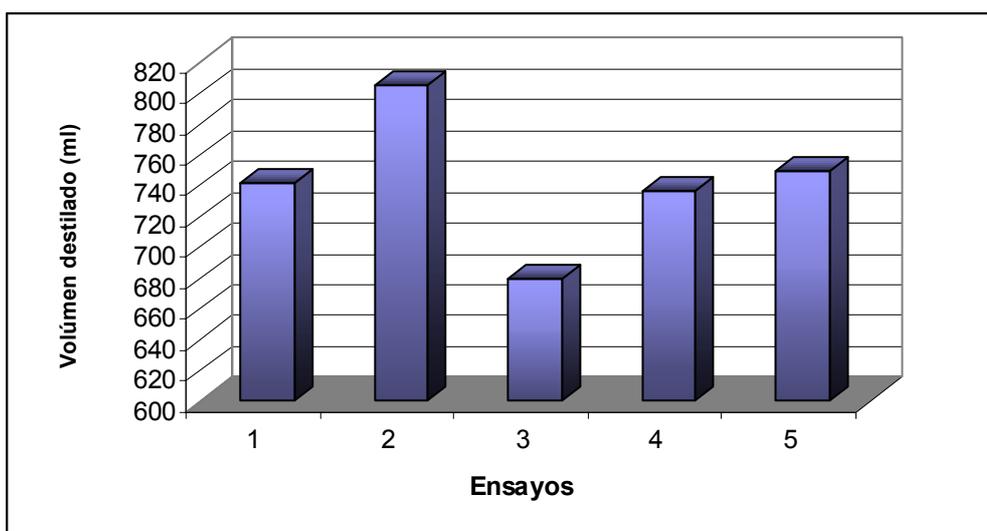


Figura 24.7.2.- Volúmenes destilados en los ensayos con ZnSO<sub>4</sub> en intercambiador de columna recta vertical

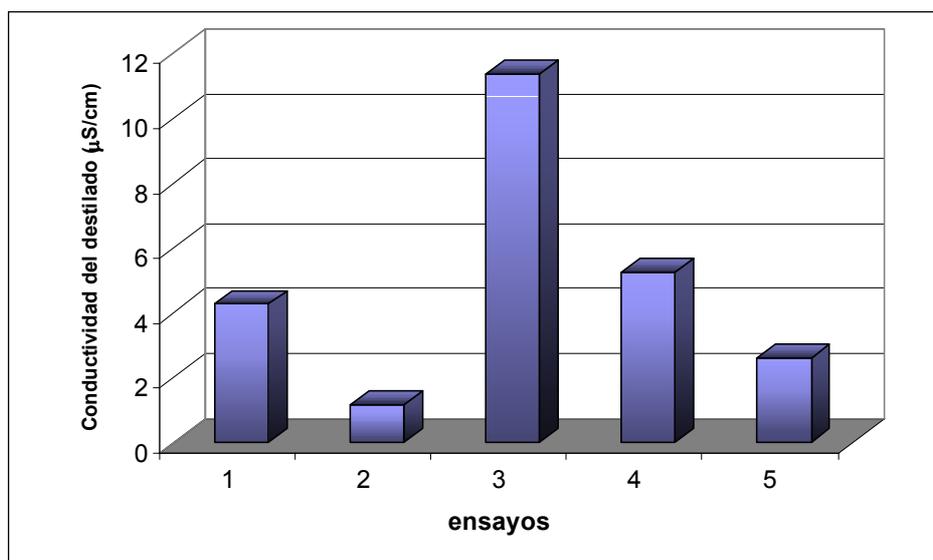


Figura 24.7.3.- Conductividades de destilado en los ensayos con  $ZnSO_4$  en intercambiador de columna recta vertical

De estos resultados puede observarse que, los volúmenes destilados se sitúan en el rango de 670-800 ml, mostrando éstos un gran valor de pureza (menos de  $10 \mu S/cm$ ). La conductividad de destilado en el ensayo “3” que se muestra en la figura 24.7.3. se origina como consecuencia de un fenómeno de evaporación súbita no controlado, ocurriendo por ello una contaminación del destilado con sales procedentes del líquido alimento.

#### 24.8.- Ensayos por recargas con disoluciones de $ZnSO_4$ en intercambiador de doble columna en espiral

Se presentan a continuación las gráficas resumen de los resultados obtenidos en los ensayos correspondientes a la evaporación de disoluciones de  $ZnSO_4$  en el MEPA #2 con intercambiador de doble columna en espiral para  $65^\circ C$  de temperatura de calefacción y 60-64 cm Hg de vacío suministrado al sistema.

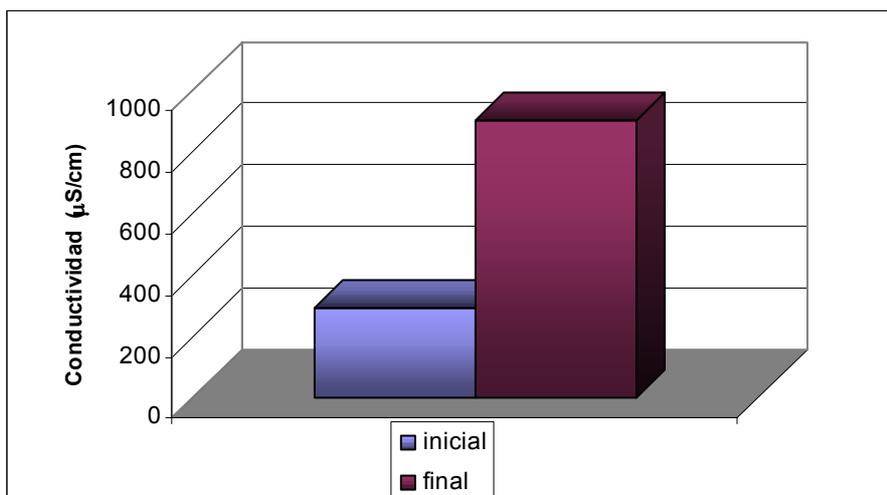


Figura 24.8.1.- Conductividades medias del líquido al inicio y final de los ensayos con  $ZnSO_4$  en intercambiador de doble columna en espiral

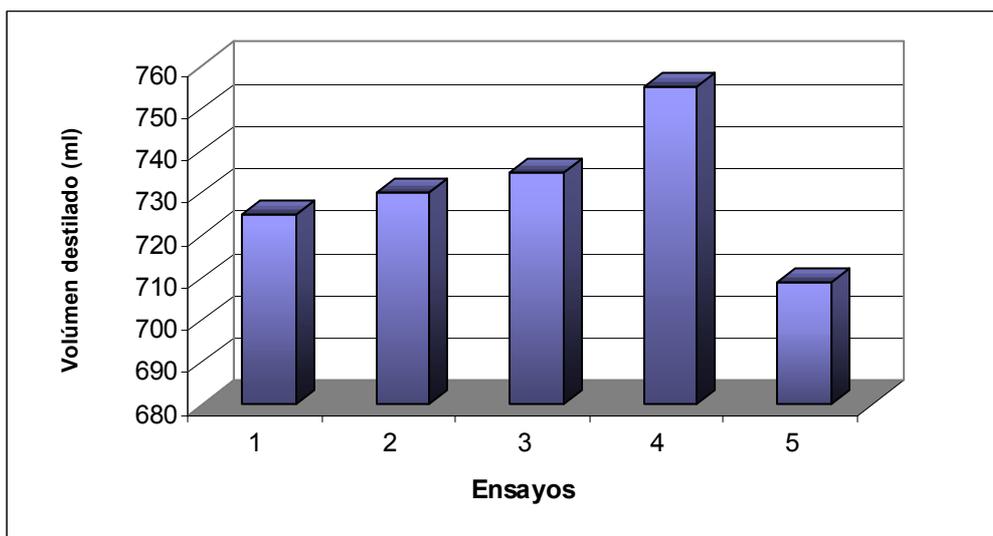


Figura 24.8.2.- Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con  $ZnSO_4$  en intercambiador de doble columna en espiral

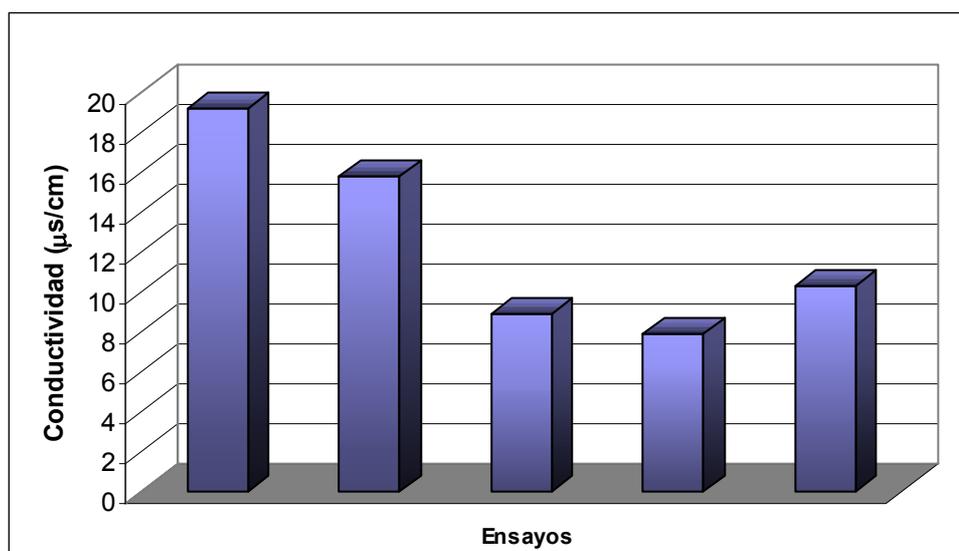


Figura 24.8.3.- Conductividades del destilado en los ensayos con  $ZnSO_4$  en intercambiador de doble columna en espiral

Los resultados obtenidos relativos al caudal destilado son inferiores a los obtenidos en ensayos anteriores y muy poco homogéneos. Esto, unido a los elevados valores de conductividad medida en el destilado hace suponer, como en efecto se observó durante la realización de los mismos, una transmisión de calor al líquido problema muy poco estable. Con ello aumenta el riesgo de sufrir fenómenos de evaporación flash súbitas y poco controladas, lo que altera el normal funcionamiento del evaporador y, por efecto de las salpicaduras, aumenta la probabilidad de contaminación del destilado.

### Ensayos con $NiSO_4$

#### 24.9.- Ensayos por recargas con disoluciones de $NiSO_4$ en intercambiador de columna recta vertical

Se presentan líneas abajo los resultados de los ensayos realizados a 62-64 cm Hg de presión de vacío y 65°C de temperatura de calefacción con la configuración del intercambiador de columna recta vertical para el caso de disoluciones de 0,5 g/l de  $NiSO_4$  de líquido alimento.

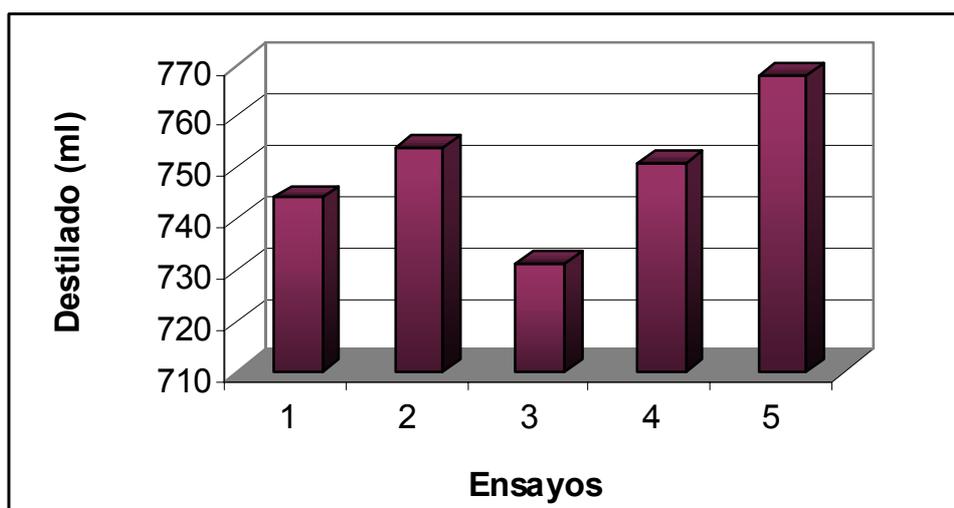


Figura 24.9.1.- Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con  $\text{NiSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical

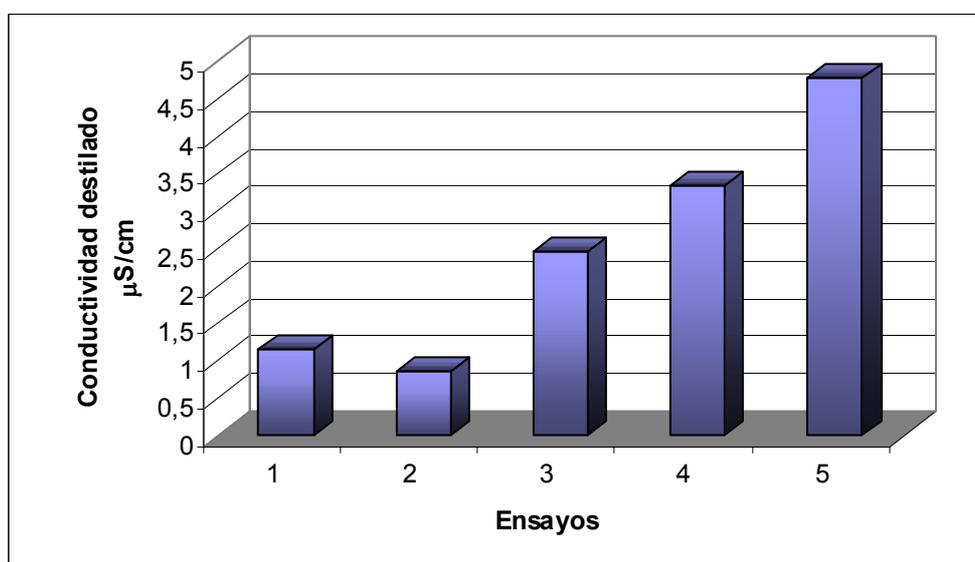


Figura 24.9.2.- Conductividades del destilado en los ensayos con  $\text{NiSO}_4$  en intercambiador de columna recta vertical

En los resultados presentados puede observarse los bajos valores de conductividad que presenta el destilado obtenido, así como la homogeneidad de los volúmenes destilados obtenidos que oscilan en el rango de 730 a 765 ml.

### 24.10.- Ensayos por recargas con disoluciones de NiSO<sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral

En el presente subapartado se presentan los resultados de los ensayos realizados a 62-64 cm Hg de presión de vacío y 65°C de temperatura de calefacción con la configuración del intercambiador de doble columna en espiral, trabajando con disoluciones de 0,5 g/l de NiSO<sub>4</sub> de líquido alimento.

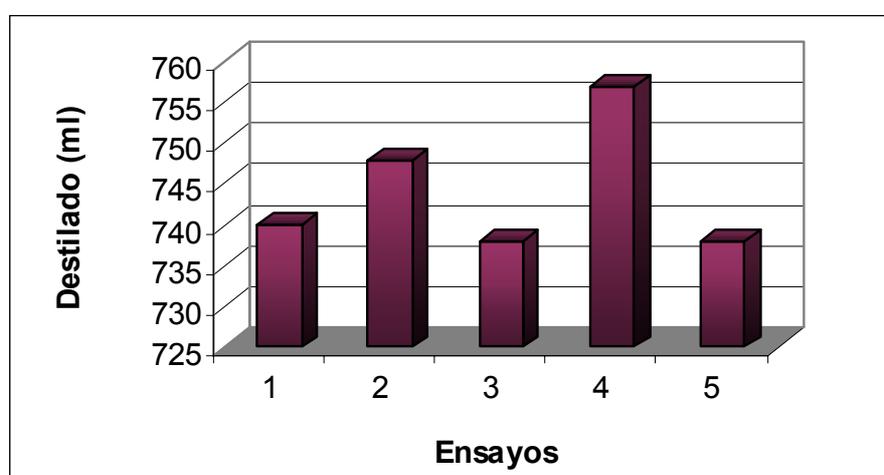


Figura 24.10.1.- Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con NiSO<sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral

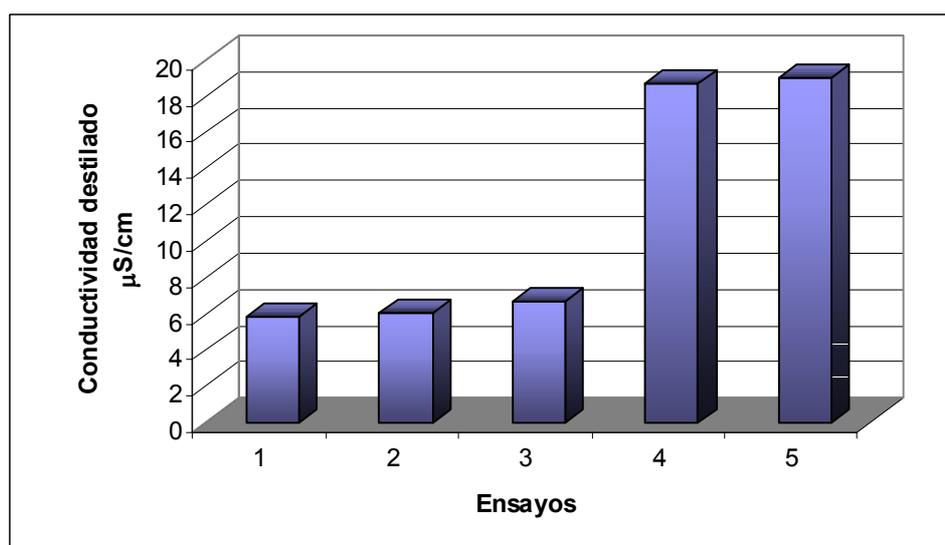


Figura 24.10.2.- Conductividades del destilado en los ensayos con NiSO<sub>4</sub> en intercambiador de doble columna en espiral

Puede verse que los valores de volumen y conductividad del destilado se encuentran en los rangos de 735 y 755ml y 5,2 y 6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  respectivamente, a excepción de los dos últimos valores obtenidos de conductividad en el destilado que resultan ser marcadamente superiores. Esto es debido a la aparición de fenómenos violentos de evaporación flash, que ocurren debido a variaciones puntuales no controladas del vacío suministrado o el caudal de calefacción, y que provocan arrastres de concentrado junto con el vapor destilado, contaminándose así el líquido depurado obtenido. Los valores determinados, a excepción de estos dos últimos, entran dentro de los rangos obtenidos en otros ensayos similares con diferentes productos.

## Ensayos con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$

### 24.11.- Ensayos en continuo con disoluciones de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ en intercambiador de columna recta vertical

---

En este subapartado se presentan los resultados de los ensayos realizados con intercambiador de columna recta vertical y concentraciones de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  de 2 y 5 g/l, que corresponden a los subíndices 1.1, 1.2, 1.3 y 2.1, 2.2, 2.3 respectivamente.

Tabla 24.11.- Relación de referencias de los ensayos realizados con intercambiador de columna recta y  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  en función de su concentración inicial

Concentración inicial g/l	Indicadores de ensayos
2	1.1, 1.2, 1.3
5	2.1, 2.2, 2.3

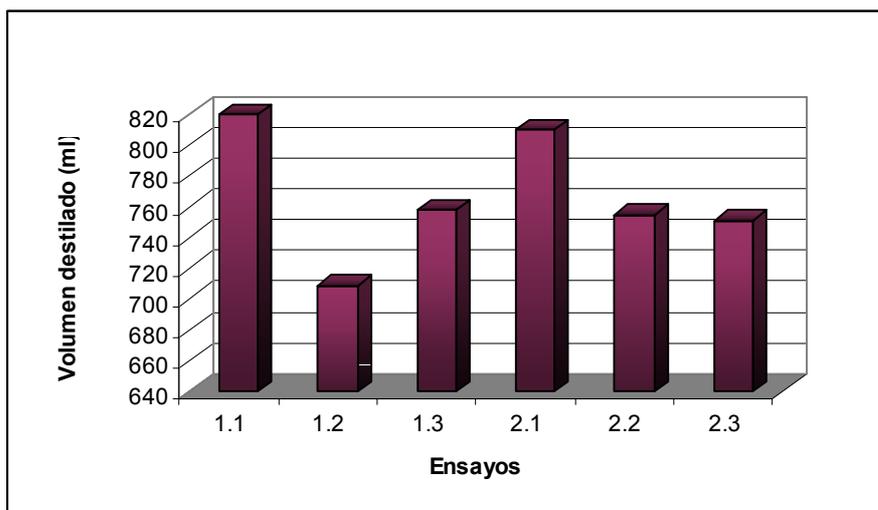


Figura 24.11.1.- Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con  $K_2Cr_2O_7$  a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en intercambiador columna recta

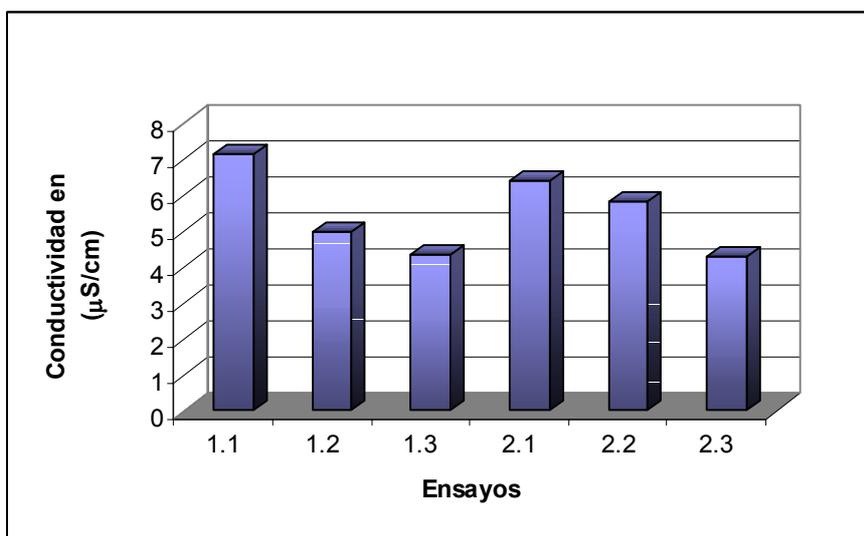


Figura 24.11.2.- Conductividad del destilado obtenido en los ensayos con  $K_2Cr_2O_7$  a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en intercambiador columna recta

Se observa en las figuras mostradas en este subapartado que los volúmenes obtenidos en los ensayos varían ligeramente en torno a los 750 ml así como las conductividades de los destilados obtenidos en los ensayos realizados son todas inferiores a los 10  $\mu$ S/cm. Todo esto, unido a la duración promedio de los ensayos que se encuentra en torno a los 45 minutos conduce a la obtención de un caudal promedio en continuo de 1 l/h.

### 24.12.- Ensayos en continuo con disoluciones de $K_2Cr_2O_7$ en intercambiador de doble columna en espiral

Se presentan aquí resultados homólogos a los del subapartado anterior pero con la particularidad de que éstos han sido obtenidos con un intercambiador de doble columna en espiral:

Tabla 24.12.- Relación de referencias de los ensayos realizados con intercambiador de doble columna en espiral y  $K_2Cr_2O_7$  en función de su concentración inicial

Concentración inicial g/l	Indicadores de ensayos
2	3.1, 3.2, 3.3
5	4.1, 4.2, 4.3

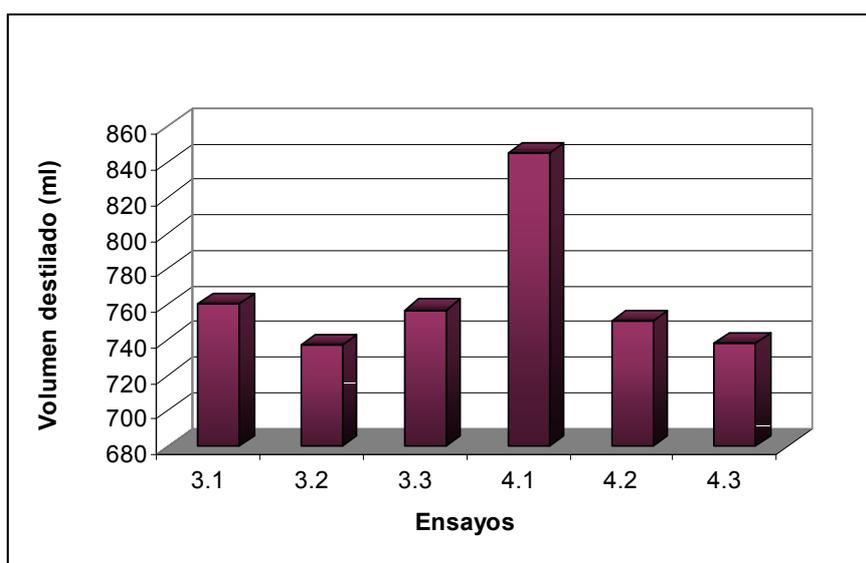


Figura 24.12.1.- Volúmenes de destilado obtenidos en los ensayos con  $K_2Cr_2O_7$  a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cmHg en intercambiador de doble columna en espiral

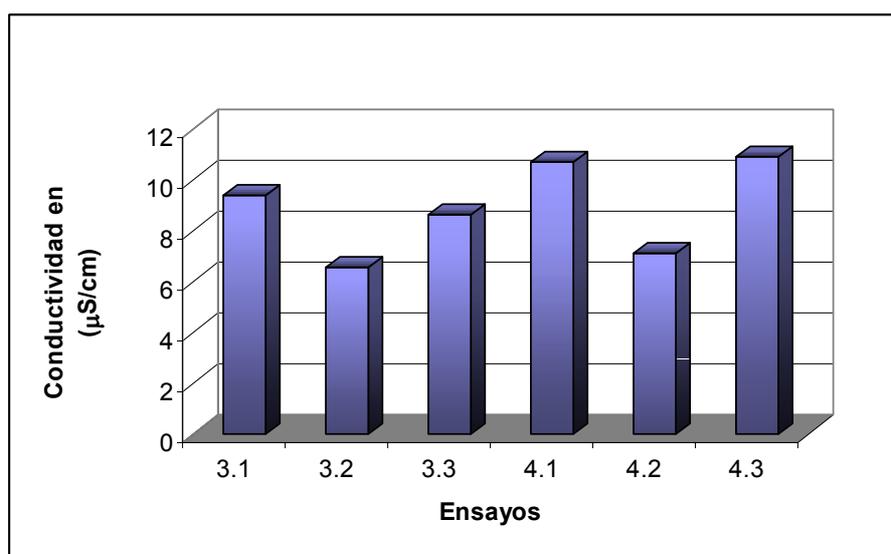


Figura 24.12.2.- Conductividad del destilado obtenido en los ensayos con  $K_2Cr_2O_7$  a concentraciones de 2 y 5 g/l y 63 cm Hg en intercambiador de doble columna en espiral

Las observaciones que se han realizado para el caso mostrado en el subapartado anterior pueden perfectamente ser asumidas por este último, puesto que los valores tanto de la conductividad del destilado como del volumen obtenido del mismo son muy similares.

La principal diferencia de este grupo de ensayos respecto al del subapartado anterior radica en la duración de los ensayos, que ha sido en torno a un 25% superior en el caso de estos últimos. La duración promedio de estos ensayos ha resultado ser de unos 60 minutos, lo que, considerando los volúmenes destilados, proporciona un caudal de 750 ml/h.

## 25.- Resultados para objetivo nº4

Se muestra a continuación una síntesis de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados para la satisfacción del cuarto objetivo de la investigación referente a la determinación y comparación de las características energéticas del proceso evaporativo en las distintas configuraciones MEPA ensayadas.

### 25.1.- Ensayos por recargas con distintas concentraciones de $K_2Cr_2O_7$ en intercambiador de columna recta vertical a distintas temperaturas de calefacción

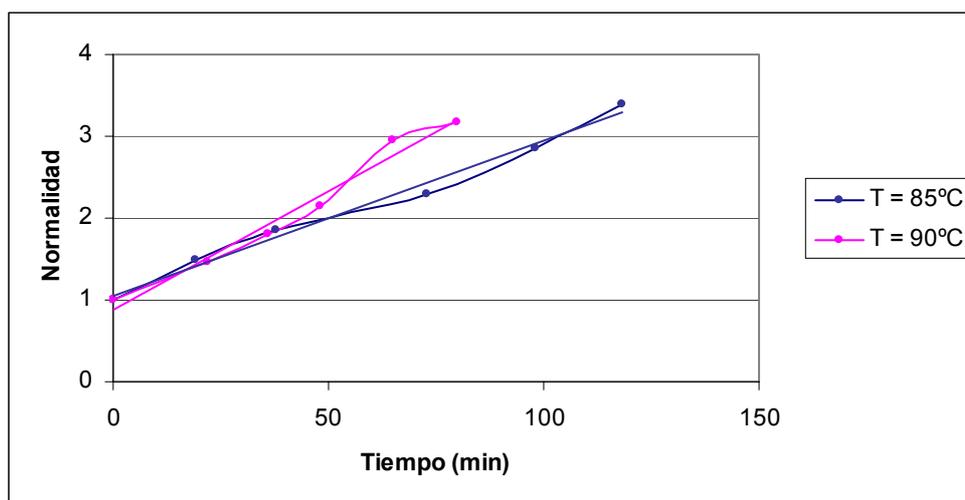


Figura 25.1.1.- Evolución de la concentración en el líquido problema a concentración inicial de 1N frente al tiempo, a distintas temperaturas y 60 cmHg de vacío en intercambiador de columna recta vertical

Puede observarse en estos ensayos, que muestran la evolución de la concentración del líquido alimento en el interior del evaporador, la linealidad de dicha evolución. La figura 25.1.1. es tan sólo un ejemplo de las diversas representaciones realizadas con los datos obtenidos de los ensayos desarrollados en este subapartado.

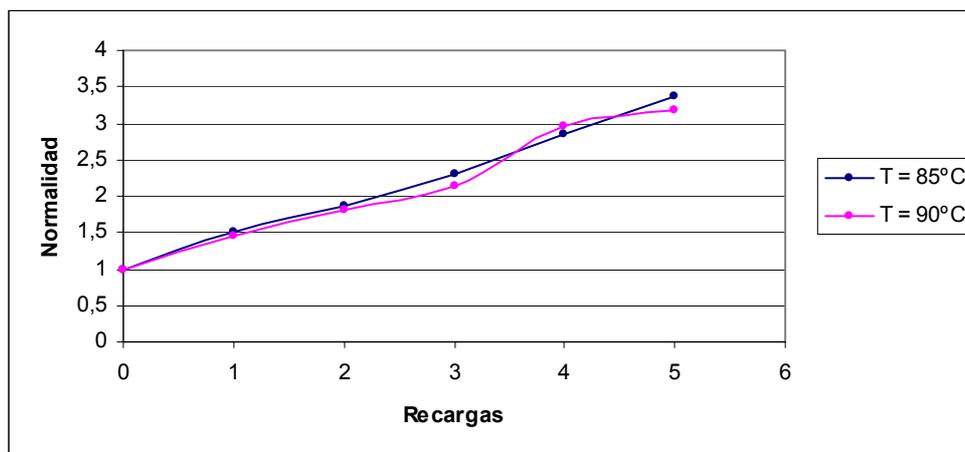


Figura 25.1.2.- Evolución por recargas de la concentración en el líquido problema a concentración inicial de 1N, a distintas temperaturas y 60 cm Hg de vacío en intercambiador de columna recta vertical

Puede concluirse, de las gráficas presentadas, que existe una dependencia directa de la duración de los ensayos con la temperatura de calefacción, así como también puede observarse que no existe tal relación entre la evolución de la concentración en el líquido problema y la temperatura de calefacción.

**25.2.- Ensayos por recargas con disoluciones de CaCl<sub>2</sub> en intercambiador de doble columna en espiral hasta alcanzar una concentración de 30 g/l**

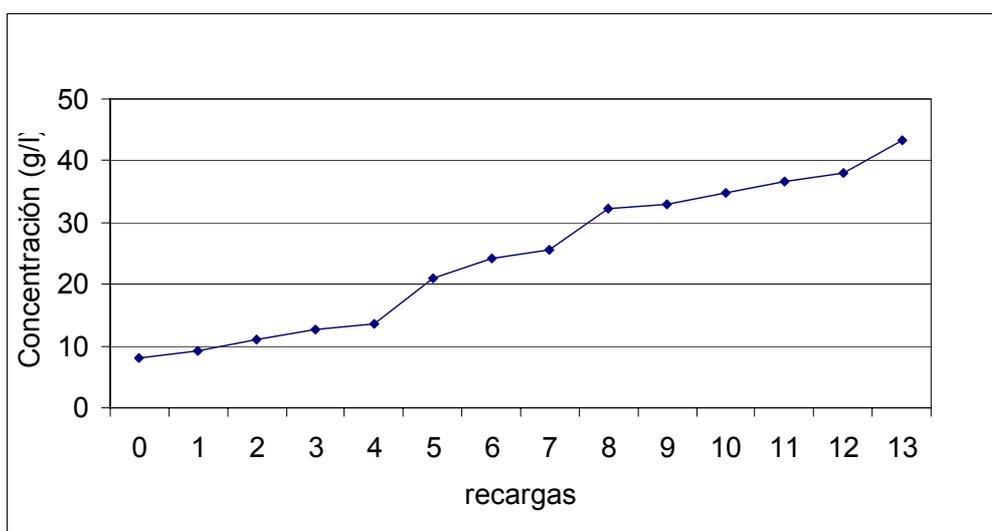


Figura 25.2.1- Evolución por recargas de la concentración del líquido alimento en ensayo con concentración inicial de 10 g/l de CaCl<sub>2</sub> a 65°C y 60 cm Hg en intercambiador de doble columna en espiral

Se observa en los resultados mostrados gráficamente la relación existente entre la concentración del líquido alimento en cada recarga realizada, antes e inmediatamente después de cada una de éstas. Asimismo también puede confirmarse la linealidad, anteriormente observada, para la evolución de la concentración en el líquido alimento conforme al tiempo de ensayo.

### 25.3.- Ensayos por recargas con disoluciones de NaCl en intercambiador de columna recta vertical hasta alcanzar una concentración de 30 g/l

Se muestran a continuación los resultados de los ensayos por recargas con distintas disoluciones de NaCl entre 3 y 21 g/l como alimento de partida, hasta alcanzar una concentración de 30 g/l o hasta lograr establecer la tendencia de la concentración del líquido alimento durante el ensayo. Los resultados mostrados corresponden a la evolución de la concentración del líquido alimento, los caudales obtenidos en cada ensayo realizado y los valores de conductividad del destilado para cada ensayo.

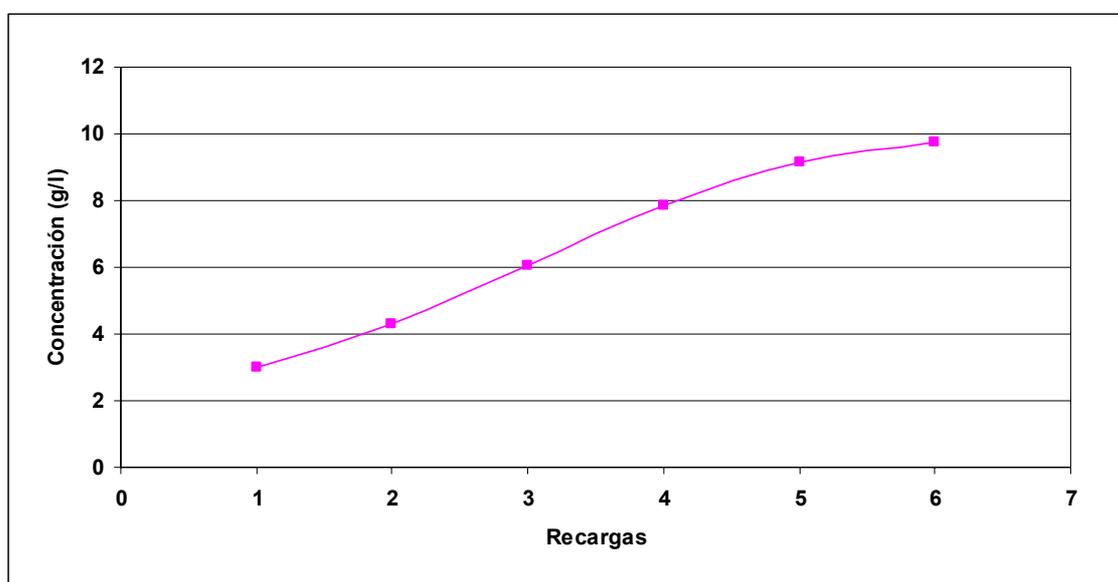


Figura 25.3.1.- Fragmento de la evolución por recargas de la concentración en el líquido alimento en intercambiador de columna recta vertical a 85°C y 60 cm Hg con concentración inicial de 3 g/l de NaCl, con 0,75 l/min de caudal de calefacción

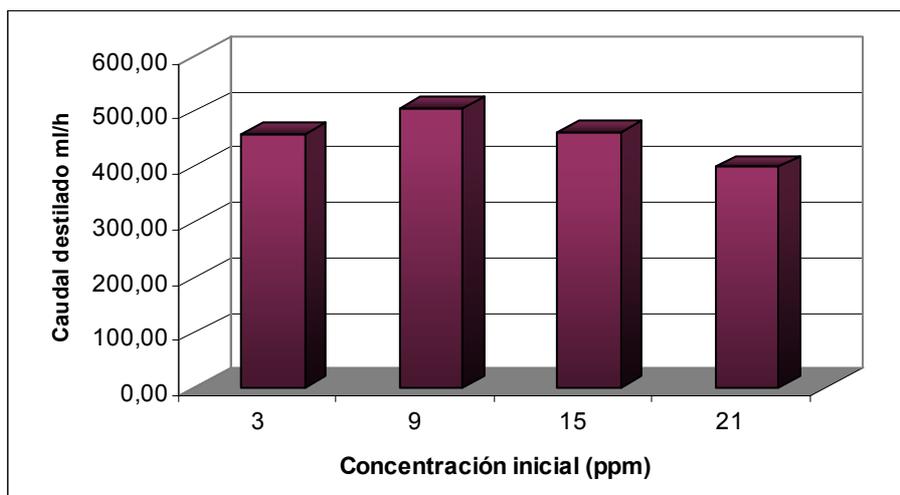


Figura 25.3.2.- Caudales de destilado obtenidos en los ensayos realizados con diferentes concentraciones de partida de NaCl en intercambiador de columna recta vertical a 85°C y 60 cm Hg, con 0,75 l/min de caudal de calefacción

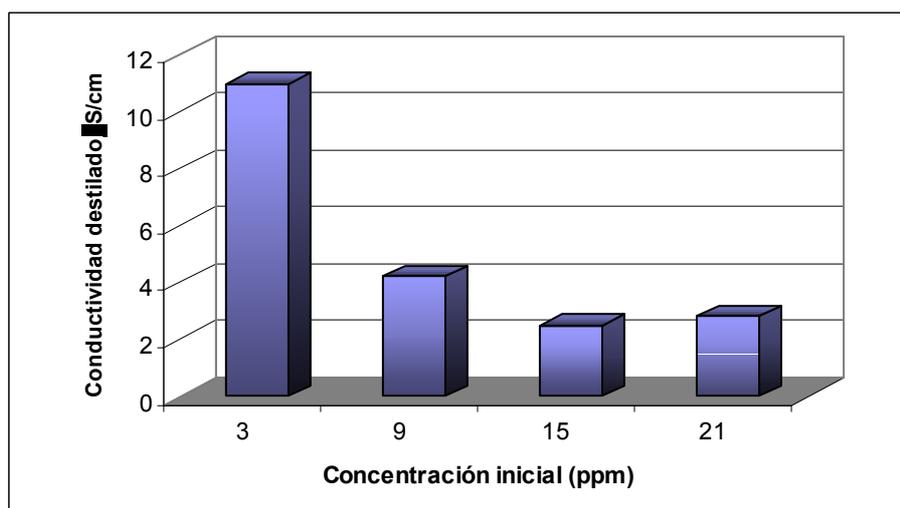


Figura. 25.3.3.- Conductividades del destilado obtenido en los ensayos realizados con diferentes concentraciones de partida de NaCl en intercambiador de columna recta vertical a 85°C y 60 cm Hg, con 0,75 l/min de caudal de calefacción

De estos resultados se observa que el valor de la conductividad del destilado es notablemente bajo. Esto indica la validez de la separación por este método. Al mismo tiempo, se observa la evolución lineal de la concentración del líquido alimento conforme avanza el ensayo y, por último, se obtienen valores de caudal destilado en torno a 500 ml/h en las condiciones ensayadas de 60 cm Hg de vacío, 85°C de temperatura de calefacción y 750 ml/min de caudal de calefacción.

## 26.- Análisis Crítico De Los Resultados De Los Ensayos: Comparativas y Discusión

### 26.1.- Análisis crítico y discusión de los resultados relativos a los rangos de temperatura y vacío a utilizar en los ensayos

Se ha considerado oportuno trabajar con los rangos de temperatura, caudal y vacío que se muestran a continuación:

**Tabla 26.1.1.- Rango de valores ensayados en las pruebas preliminares de funcionamiento**

Vacío suministrado	55 a 64cm Hg
Temperatura del líquido de calefacción	55 a 90°C
Caudal del líquido de calefacción	0,75 a 3 l/min

La justificación a estos valores viene dada por las limitaciones físicas siguientes:

- El rango de temperaturas en el que se ha trabajado ha sido el de 55°C a 90°C por coherencia con las directrices que han guiado la presente Tesis Doctoral, en especial en lo referente a la posibilidad de aprovechamiento de un flujo de agua caliente residual de origen industrial como fuente calorífica.
- El vacío suministrado no puede ser inferior a 55 cm Hg porque en ese caso no ocurriría el fenómeno de la evaporación en el líquido alimento en el rango de temperaturas considerado y no se ha superado en exceso este valor en los ensayos realizados ya que se pretende la confirmación de la bondad del modelo en las condiciones más desfavorables. Cabe esperar que valores mayores de presión de vacío ejercida sobre el sistema, suponiendo constantes el resto de variables que intervienen en el proceso, den como resultado mejores condiciones de trabajo y con ello una mayor eficiencia energética y económica del sistema.
- El caudal con el que se ha trabajado ha oscilado entre los valores de 0,75 y 3 l/min. Estos caudales generan regímenes laminares o quasilaminares para el paso del fluido calefactor por los intercambiadores de calor, siendo éstas las condiciones menos favorables al intercambio térmico entre fluidos (Bejan, A. 1995; Hesselgreaves, J.E. 2001; Levenspiel, O:1993; Kreith, F. 1999. y otros).

## 26.2.- Análisis crítico y discusión relativo a la determinación de las variables termohidráulicas que intervienen en la evaporación

Respecto a los resultados de los ensayos realizados para la determinación de las variables termohidráulicas que intervienen en el proceso de evaporación se ha considerado interesante realizar el siguiente análisis crítico:

- De los resultados de los ensayos realizados para la determinación de la relación del caudal de calefacción con otras variables se ha podido observar que existe una relación clara entre la duración del proceso evaporador para un volumen constante y el citado caudal, que se expresa en la figura 26.1.
- Asimismo, se ha podido realizar un estudio estadístico mediante el uso de los programas STATGRAPHICS Plus 5.1 y Excel 2000 de los que se extraen los siguientes resultados referentes a la expresión matemática que rige la citada relación. Puede observarse que la relación entre el tiempo de duración de la evaporación de 150 ml de agua destilada está relacionado con el caudal de calefacción mediante la expresión potencial  $y = 15,749x^{-0,477}$  con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0,951$ . El ajuste es especialmente válido en el rango considerado de valores del caudal de calefacción:

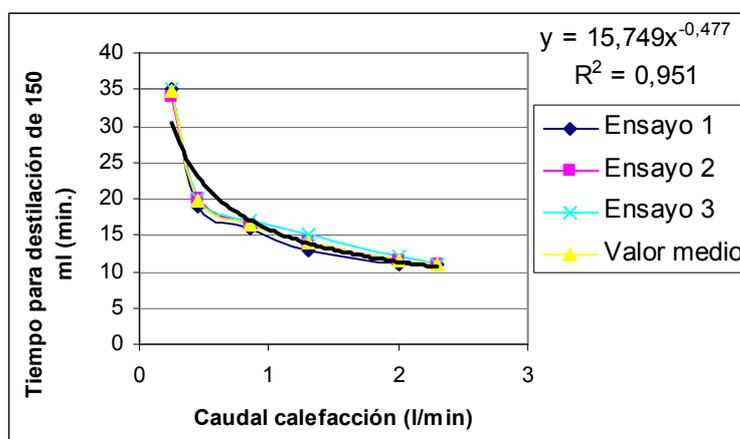


Figura 26.1.- Tiempo de duración del proceso de destilación de 150 ml de agua según el caudal de calefacción a 80°C y 60 cmHg

- Es importante la dependencia que el valor del caudal destilado tiene respecto de la temperatura de calefacción. Así, a igualdad de condiciones, la relación existente entre estas dos variables se muestra de la siguiente manera, para el caso concreto de los ensayos de evaporación de agua destilada con el intercambiador de doble columna en espiral a vacío y caudal de calefacción constantes de valores 60 cm Hg y 0,75 l/min respectivamente. Puede verse la validez del ajuste considerando el valor del coeficiente de correlación  $R^2 = 0,984$  para el caso estudiado.

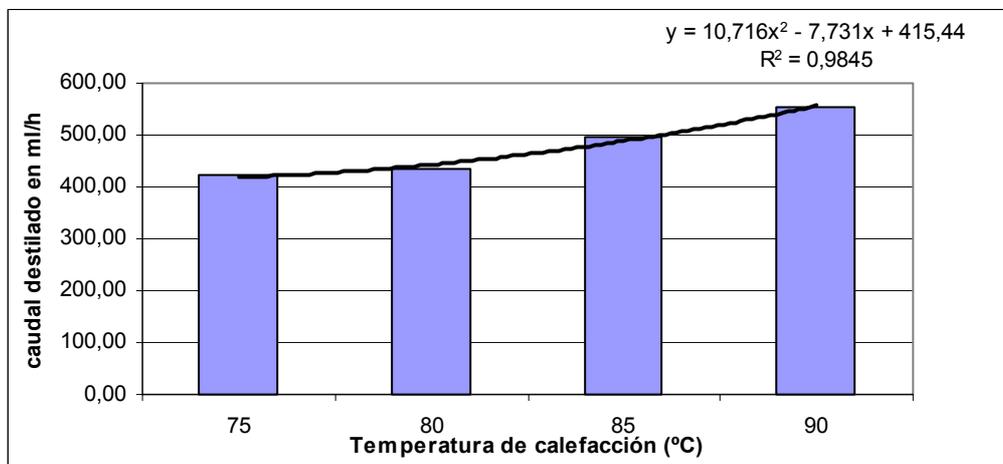


Figura 26.2.- Relación entre el caudal destilado y la temperatura de calefacción en intercambiador de doble columna en espiral a presión de vacío y caudal de calefacción constantes y de valores 60cm Hg y 0,75 l/min respectivamente

- Asimismo, el vacío suministrado al sistema tiene también una importancia destacada en el caudal destilado, observándose una tendencia no lineal para todos los ensayos realizados con un Rotovapor, con variaciones de vacío entre 40 y 55 cm Hg y temperatura de baño termostático constante. Para el caso particular del ensayo realizado con una disolución de NaCl de 5g/l a 80°C de temperatura del baño termostático, el ajuste de la tendencia del volumen destilado por ensayo respecto del vacío generado es el siguiente:  
 $y = 0,31x^2 - 25,31x + 516,35$  con un coeficiente de correlación de  $R^2=1$ , tal como puede verse en el gráfico que se adjunta.

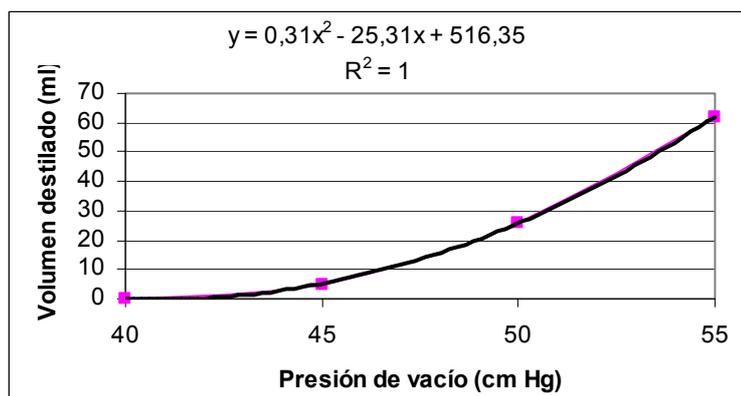


Figura 26.3.- Evolución del volumen destilado con un rotavapor a distintas presiones de vacío, 80°C de temperatura Y 5 g/l de concentración inicial de NaCl

- Por último, ha sido destacable la mejora producida por la utilización de un precalentamiento previo del alimento a la entrada del intercambiador de calor, consiguiéndose reducciones superiores al 15% en el tiempo medio de duración de los ensayos, como puede verse en la comparativa siguiente:

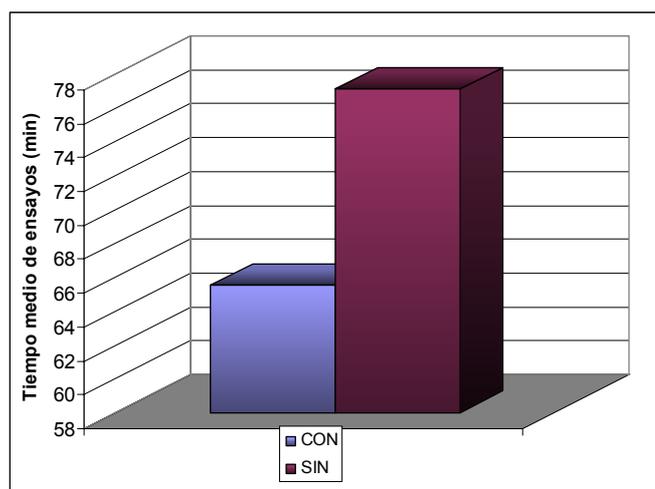


Figura 26.4.- Tiempo medio de duración de ensayos de 5 recargas con disoluciones de NaCl de entre 5 y 30 g/l a 80°C y 60cm Hg con y sin precalentamiento

De todo lo anteriormente afirmado se deduce que el caudal destilado (F) es una variable dependiente, fundamentalmente, de las siguientes: Temperatura del alimento ( $T_{alim}$ ), Temperatura de calefacción ( $T_c$ ), Caudal de calefacción ( $F_c$ ) y Vacío suministrado (P). Se cumple, por tanto, con esta afirmación el objetivo nº2 de la investigación realizada “Determinación de las variables termohidráulicas que intervienen”.

### 26.3.- Análisis crítico y discusión relativo a los caudales de destilado obtenidos

A modo de análisis crítico de los valores obtenidos de caudal destilado para las dos configuraciones MEPA ensayadas, se presentan los siguientes comentarios:

- Existe una marcada diferencia entre caudales de destilado obtenidos en función al caudal de calefacción empleado (ver apartados 23.1, 23.4, 24.11 y 24.12). Así, según éste haya sido de 3 l/min o 0,75 l/min, los caudales han variado en más de un 50% como puede verse en la comparativa que se muestra en la figura 26.5.
- En la hipótesis de darse una evolución lineal del caudal destilado en función del caudal de calefacción, manteniéndose constantes las demás variables que entran en juego en el sistema, la expresión matemática que define la citada relación es la siguiente:  $y = -540x + 1540$ , lo que evidentemente da un valor de  $r^2 = 1$ , pudiendo ser ésta una aproximación al modelo matemático que se desprende de los resultados de los ensayos realizados en lo relativo a la expresión matemática de la relación entre caudal de calefacción y caudal destilado.

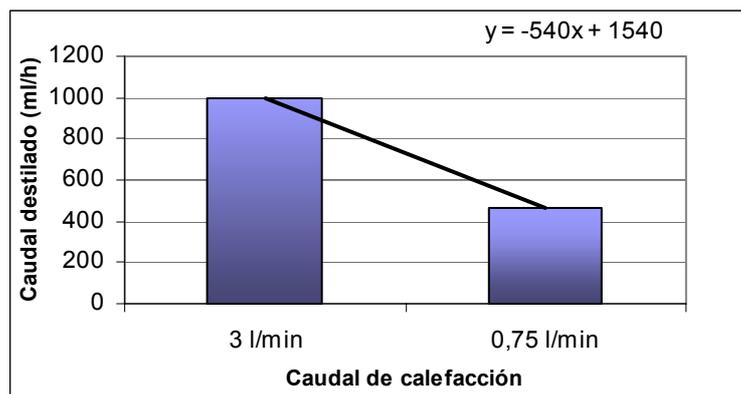


Figura 26.5.- Caudales destilados en intercambiador de columna recta en función del caudal de calefacción a 65°C y 64 cm Hg

- Existe una marcada diferencia entre los caudales de destilado obtenidos en función al sistema intercambiador de calor utilizado. Así, con un vacío generado de 64 cm Hg y para un caudal de calefacción de 3 l/min a 65°C, mientras para el

intercambiador de calor de columna recta vertical el caudal de destilado ha sido aproximadamente de 1000 ml/h, este valor se ha visto reducido a aproximadamente 750 ml/h para el caso del intercambiador de doble columna en espiral, en idénticas condiciones.

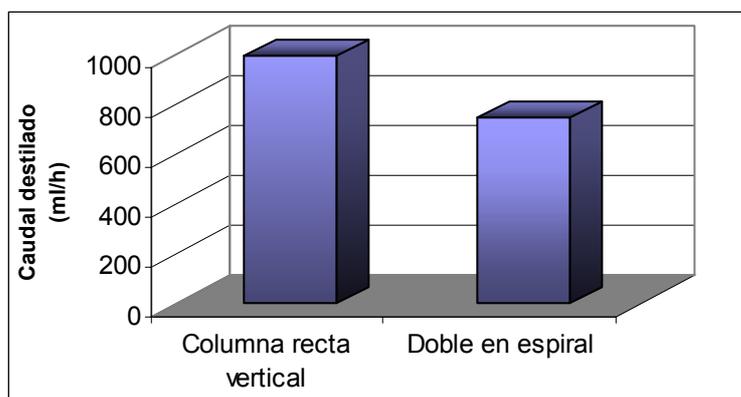


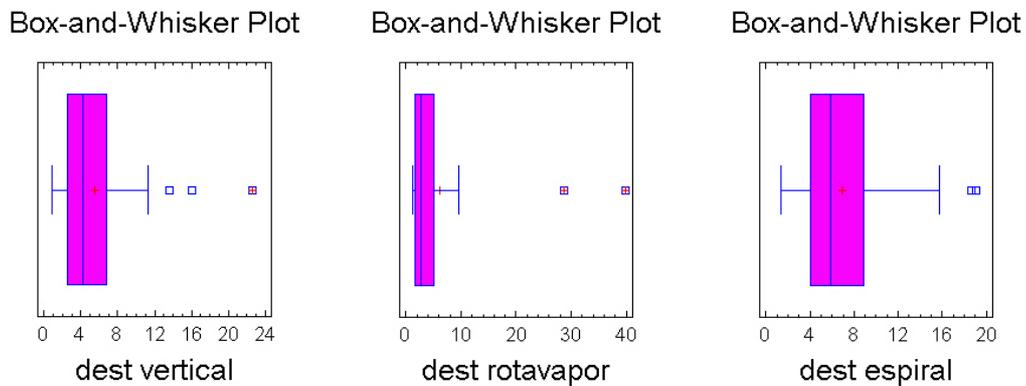
Figura 26.6.- Caudales destilados en las distintas configuraciones de intercambiador utilizadas en las condiciones más favorables de funcionamiento

#### 26.4.- Análisis crítico y discusión relativo a las conductividades del destilado obtenido

Un estudio detenido de los resultados de la determinación de la conductividad del destilado obtenido en los diversos ensayos realizados, permite realizar las siguientes afirmaciones:

- La concentración de sales en el destilado ha sido en la mayoría de los casos muy baja, pudiendo asimilarse el agua obtenida por el procedimiento ensayado a un agua destilada para uso de laboratorio.
- El valor de conductividad ha sido muy homogéneo en la mayoría de ensayos realizados, teniéndose muy pocos valores fuera del rango esperado, tal como se muestra en el diagrama Box-Wisker resultado del estudio estadístico realizado sobre esta variable. Se han obtenido resultados promedio considerablemente inferiores a 8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y dispersiones relativamente pequeñas tal como muestran

las anchuras de las cajas (Figura 26.7.) para cada una de las tres opciones ensayadas.



#### Resultados expresados en $\mu\text{Siemens/cm}$

Figura 26.7.- Análisis box and wisker de los valores de conductividades del destilado obtenido para cada configuración utilizada

- Los valores superiores de conductividad del destilado obedecen a fenómenos de evaporación súbita o flash no controlados que provocaban salpicaduras del líquido alimento en el conducto de refrigeración y finalmente llegaban restos del líquido alimento al recipiente destinado a la colección del agua destilada, con lo que ésta resultaba contaminada. Estos fenómenos eran fácilmente identificables durante la evolución del ensayo por la espectacularidad de los mismos así como también por los resultados de la conductividad en el destilado, fuera de todo rango esperable en un ensayo normal.

En los gráficos Box and Wisker presentados, estos valores anómalos se ven representados como pequeños cuadros por encima del rango de valores comprendidos dentro de la caja.

Con los resultados, análisis y discusión presentados en este subapartado y en el anterior, se satisface la primera parte del objetivo nº3 de la investigación “Determinación de la calidad del destilado y concentrado para cada montaje”.

### 26.5.- Análisis crítico y discusión relativo a la evolución de la concentración de la disolución alimento a lo largo de un ensayo

Se ha podido comprobar que existe una clara tendencia de tipo lineal seguida por la variable concentración del líquido alimento en función del tiempo en el desarrollo normal de un ensayo tipo. Esta tendencia lineal presenta ecuaciones distintas en función al valor que adopten las demás variables que entran en juego, definidas en el subapartado 26.2 de la presente Tesis Doctoral.

Del estudio estadístico realizado sobre la relación entre la concentración en el líquido alimento y las demás variables que intervienen en el proceso en el desarrollo normal de un ensayo, se presentan como muestra las siguientes gráficas:

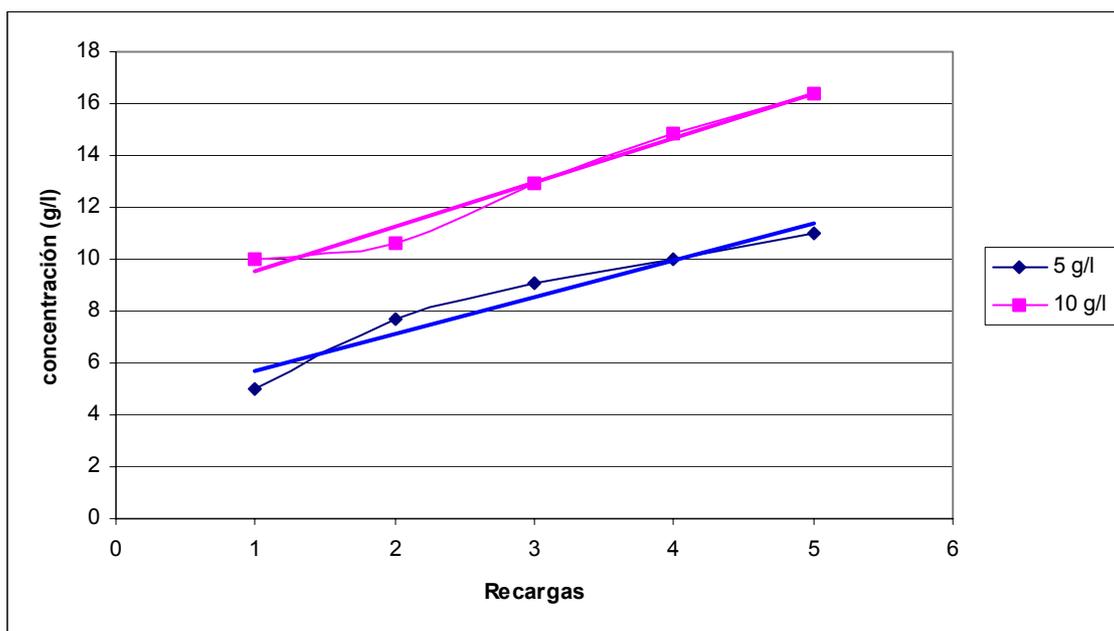


Figura 26.8.- Ajuste lineal de la evolución de la concentración en el líquido alimento durante la evolución de dos ensayos tipo en intercambiador de columna recta vertical a 80°C y 60 cm Hg. a) 5 g/l de NaCl b) 10 g/l de NaCl

- La tendencia lineal que muestra la evolución de la concentración del líquido alimento en el interior del evaporador respecto al tiempo de duración del ensayo, responde a diferentes ecuaciones de primer orden, del tipo  $y = ax + b$ .

- La tendencia lineal que muestra la evolución de la concentración del líquido alimento en el interior del evaporador respecto al tiempo de duración del ensayo está directamente relacionada con las variables que intervienen en el proceso de evaporación que han sido definidas en el subapartado 26.2. puesto que las ecuaciones que definen dicha tendencia son diferentes en función a los valores que adopten las variables en cuestión.
- La temperatura de entrada del líquido alimento es una variable que influye de manera muy importante en la duración de los ensayos pero no tanto en la evolución de la conductividad del líquido alimento, tal como puede deducirse de la comparativa presentada líneas arriba y las distintas expresiones matemáticas que se obtienen como resultado del estudio estadístico realizado.
- Del estudio estadístico realizado no ha podido obtenerse una expresión matemática que relacione todas las variables definidas con el valor de la concentración en el líquido alimento. Para ello, y según los resultados de la aplicación del programa STATGRAPHICS Plus 5.1, son necesarios un número mayor de datos, con la finalidad de obtener una relación estadísticamente válida. No obstante, la investigación realizada y los resultados en ella alcanzados pueden servir de base a futuros trabajos en aras a la determinación la expresión matemática que relacione las citadas variables.

#### **26.6.- Análisis crítico y discusión relativo a la duración de los ensayos**

---

Se considera interesante realizar, en este apartado, un breve comentario respecto a la duración temporal de los ensayos así como de la relación que ésta tiene con las variables termohidráulicas definidas en la investigación realizada. De la observación y análisis de los resultados y tiempos de duración de cada uno de los ensayos realizados se desea destacar lo siguiente:

- La duración temporal de los ensayos presenta una considerable heterogeneidad. Esto indica que existen factores que afectan directa o indirectamente al periodo necesario para la realización de cada ensayo.
- A priori puede pensarse que la concentración y tipo de contaminante en el líquido alimento puede afectar a la duración de los ensayos. Pero esto no ha resultado ser así ya que, a igualdad de condiciones, no ha habido diferencias significativas de tiempo en la duración de los ensayos realizados con distintos contaminantes y distintas concentraciones de los mismos. Cabe destacar también que sólo se han ensayado sales inorgánicas. A modo de refuerzo de esta afirmación se presenta el siguiente resultado estadístico correspondiente al estudio de la relación entre concentración inicial del líquido alimento y la duración promedio del ensayo, a 60 cm Hg de vacío y 80°C de temperatura de calefacción. Se observa la ausencia total de relación entre las variables propuestas:

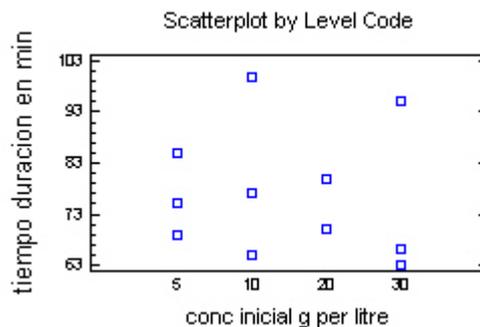


Figura 26.9.- Análisis estadístico de la relación entre la concentración inicial del líquido alimento y la duración de los ensayos, para los ensayos realizados con NaCl a concentraciones de entre 5 y 30 g/l, a 60 cm Hg de vacío y 65°C con intercambiador de columna simple vertical.

- La temperatura de entrada del líquido alimento sí ha resultado ser una variable que afecta directamente a la duración de los ensayos. Del estudio realizado a tal efecto se concluye que la reducción temporal llega a ser de un 15% de promedio, para el caso del uso de un intercambiador de columna recta vertical, tal como se muestra en el gráfico siguiente, que ya ha sido presentado con anterioridad:

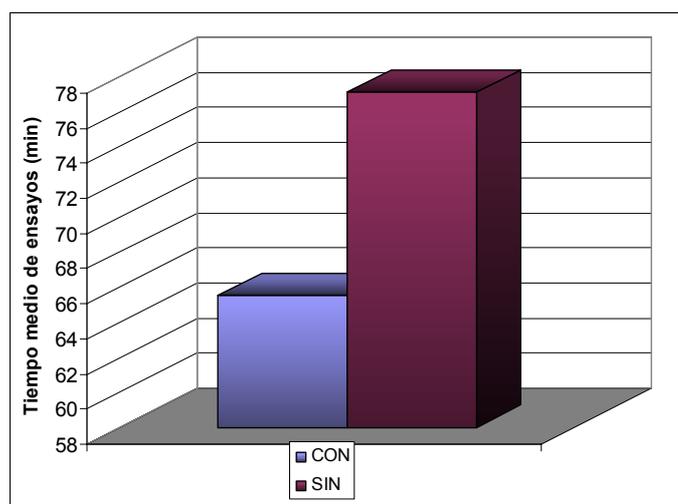


Figura 26.10.- Tiempo medio de duración de ensayos de 5 recargas con disoluciones de entre 5 y 30 g/l a 80°C y 60cm Hg con y sin precalentamiento previo del alimento en intercambiador de columna recta vertical

- El vacío y la temperatura de calefacción son otras dos variables que influyen directamente en la duración de los ensayos, puesto que a mayor vacío y temperatura más rápidamente ocurre el proceso descontaminador por evaporación en el intercambiador de calor. Así, para los ensayos realizados con el evaporador de columna recta vertical se tiene que:

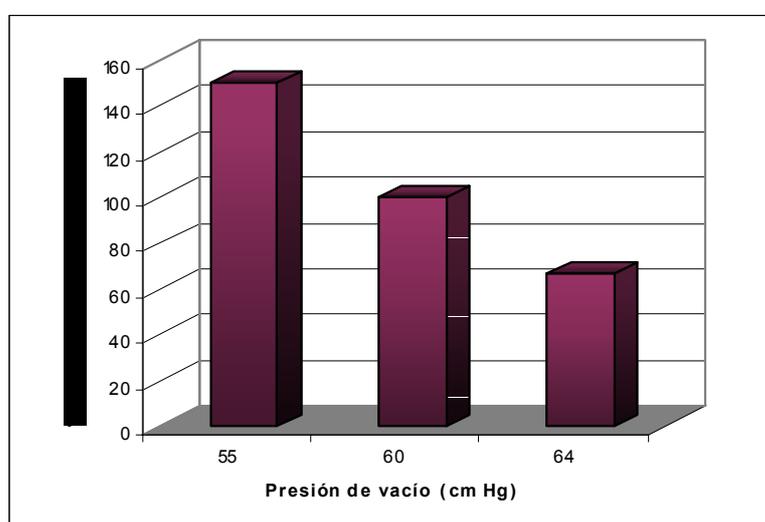


Figura 26.11.- Evolución del tiempo medio para la obtención de un litro de destilado con intercambiador de columna recta vertical a 65 °C y 3 l/min de caudal de calefacción y distintas presiones de vacío

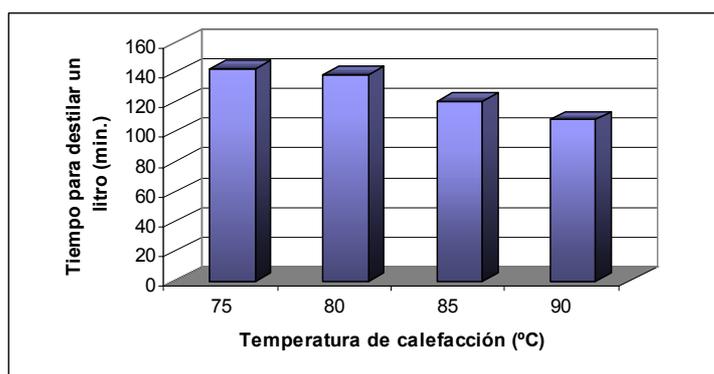


Figura 26.12.- Evolución del tiempo medio para la obtención de un litro de destilado con intercambiador de doble columna en espiral a 60 cm Hg y distintas temperaturas de calefacción a 0,75 l/min de caudal calefactor

Las figuras 26.11. y 26.12. muestran claramente la relación que, temperatura de calefacción y presión de vacío ejercida sobre el sistema, tienen con el tiempo de duración de los ensayos.

En las figuras que se muestran se ha considerado el tiempo necesario promedio para la obtención de un litro de destilado. La relación entre temperatura de calefacción y tiempo de duración de los ensayos, así como la relación entre el vacío generado en el sistema y la duración de los ensayos son de tipo inverso.

## ESTUDIO ENERGÉTICO

VIII

---

27. Descripción de los métodos de cálculo energético para intercambiadores de calor	159
28. Estudio energético del MEPA #1	167
29. Estudio energético del MEPA #2	175
30. Síntesis de los resultados energéticos obtenidos	183



## 27.- Descripción de los métodos de cálculo energético para intercambiadores de calor

El conocimiento en profundidad de la energética del proceso evaporador, que se desarrolla en el interior de los intercambiadores de calor utilizados en el MEPA en cualquiera de sus dos configuraciones básicas, es de gran importancia puesto que de la eficiencia de ésta depende la economía global del proceso.

También es interesante conocer la energética del proceso evaporador en cada momento para poder determinar las pérdidas de calor que ocurren en él y así poder satisfacer las necesidades de aislamiento del MEPA diseñado.

### 27.1.- Consideraciones energéticas previas

Para la realización de las determinaciones energéticas que se presentarán en adelante es necesario establecer primero las expresiones matemáticas de uso más común en este ámbito:

Tabla 27.1.- Apuntes energéticos del glosario de términos

<u>Número de Reynolds.</u>	$Re = \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)$	Ec. 27.1.
donde $D_e$ es el diámetro equivalente de la conducción que transporta al fluido, $G_s$ es el producto de la velocidad por la densidad del fluido y $\mu$ es la viscosidad absoluta.		
<u>Número de Prantdl.</u>	$Pr = \frac{\mu / \rho}{k / (\mu \cdot C_p)} = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$	Ec. 27.2.
donde $C_p$ es el calor específico del fluido y $k$ es el coeficiente de transmisión del calor por conducción de dicho fluido.		
<u>Número de Nusselt.</u>	$Nu = \frac{h_c \cdot D_e}{k}$	Ec.27.3.
donde todos los parámetros que conforman la citada expresión matemática son ya conocidos.		

Tras la aclaración de los anteriores conceptos, y considerando la problemática de la transmisión de calor de manera más general, se sabe que:

El calor puede transmitirse por conducción, radiación y convección siendo las ecuaciones que los rigen las que se muestran a continuación.

Transmisión del calor por conducción.

Cuando en una sustancia homogénea existe un gradiente de temperatura, el calor que se transmite debido a dicho gradiente puede ser calculado por la denominada Ley de Fourier, donde k es la conductividad térmica del material y S el área a través de la cual se transmite el calor.

$$Q = -k \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \qquad \text{Ec. 27.4. Ley de Fourier}$$

Transmisión del calor por radiación.

Esta manera de transmisión del calor es debida a la propagación de ondas electromagnéticas entre dos cuerpos que están a diferente temperatura absoluta y ésta es muy importante ya que el calor transmitido es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas absolutas elevadas a la cuarta potencia.

La ecuación de Stephan-Boltzman es la que determina este tipo de transmisión de calor:

$$Q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4) \qquad \text{Ec.27.5. Ley de Stephan-Boltzman}$$

En esta ecuación, ε es la emisividad de la superficie, S es el área de dicha superficie y σ es la constante de Stephan-Boltzman ( $\sigma=5.67+10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ )

Transmisión del calor por convección.

La convección consiste en la transmisión de calor de un fluido a un cuerpo mediante la aparición de corrientes en el fluido provocados por diferencias de temperatura en el fluido, aunque estas corrientes bien pueden ser forzadas. Esta clase de transmisión de

calor sigue la ley de enfriamiento de Newton, aunque no existe ninguna ecuación matemática sencilla para la determinación teórica de los coeficientes de transmisión del calor (tanto el individual,  $h_c$ , como el coeficiente global  $U$ ). Es por ello por lo que la determinación de  $h_c$  y  $U$  es generalmente realizada de forma experimental:

$$Q = h \cdot S \cdot (T_1 - T_2)$$

Ec.27.6. Ley de enfriamiento de Newton

Donde  $h_c$  es el coeficiente individual de transferencia de calor por convección, de difícil determinación teórica. Si se desea calcular teóricamente, existen diversas fórmulas para ello.

Una manera de determinar  $h_c$  es utilizar la ecuación de Dittus-Boelter que obedece a la siguiente expresión:

$$Nu_D = 0.023 Re_D^{0.8} \cdot Pr^n \leftrightarrow 10^4 \langle Re \rangle 10^6 \quad \text{Ec. 27.7. Dittus-Boelter}$$

$$Nu_D = 0.027 Re_D^{0.8} \cdot Pr^{1/3} \leftrightarrow 2300 \langle Re \rangle 10^4 \quad \text{Ec. 27.8. Dittus-Boelter}$$

Donde  $Nu_D$  es el Número de Nusselt,  $Re_D$  es el número de Reynolds,  $Pr$  es el número de Prantdl (Ver Tabla 27.1) y  $n$  es un valor que varía entre 0,3 y 0,4 en función a las condiciones de funcionamiento del intercambiador de calor.

Algunos autores (Kakaç, S. 1998) han dedicado mucho esfuerzo en el establecimiento de un procedimiento lo menos complejo posible de determinación teórica del coeficiente individual de transferencia de calor por convección ( $h_c$ ) y del coeficiente global de transferencia de calor ( $U$ ), para el caso concreto de un evaporador multitubular. Otros autores (Kakaç, S. 1998; Incropera F.P. 1996), facilitan valores tabulados para la estimación de estos coeficientes. Algunas expresiones matemáticas para de determinación del coeficiente individual de transferencia de calor por convección son:

Tabla 27.2.- Diversas ecuaciones matemáticas para la determinación teórica de  $h_c$ 

$h_c = 3.66 \frac{k}{D}$ Ec. 27.9	Para temperatura uniforme en la pared y régimen laminar en el líquido
$h_c = 0.023 \frac{v^{0.8} k^{0.6} (\rho \cdot cp)^{0.4}}{D^{0.2} v^{0.4}}$ Ec. 27.10	Para régimen turbulento en el líquido
$h_c = 0.664 k \sqrt{\frac{V}{v \cdot L}} \cdot Pr^{1/3}$ Ec. 27.11	Para convección forzada

(Ver glosarios)

En las expresiones mostradas en la tabla 27.2, D es el diámetro, v es la velocidad de flujo y  $\nu$  es la viscosidad cinemática.

### 27.2.- Intercambiadores de calor de tubos concéntricos

En los sistemas de intercambio de calor de tubos concéntricos, a los que son asimilables las configuraciones MEPA diseñadas y ensayadas, y en general en cualquier intercambiador de calor en el que un fluido y un cuerpo sólido intercambien energía calorífica, se dan dos fenómenos de transmisión de calor conjuntamente: conducción y convección. Así, para nuestro caso, resulta importante conocer, tanto teórica como experimentalmente el coeficiente global de transmisión de calor (U).

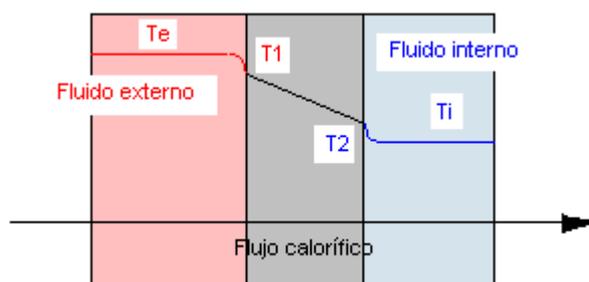


Figura 27.2.1.- Representación gráfica de la actuación conjunta de la conducción y la convección en la transmisión de calor en un intercambiador de tubos concéntricos

En la imagen se muestra la formación de una pequeña película de líquido en ambos lados de una pared a través de la cual se está transmitiendo calor por conducción. Las pequeñas películas líquidas implican una transmisión de calor debido a la convección,

por lo que en problemas reales no se tratan por separado los distintos modos de transmisión sino que las resistencias térmicas de éstos se aúnan en el denominado coeficiente global de transferencia de calor:

Para el caso de tubos cilíndricos,

$$U = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2 / r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} \quad \text{Ec. 27.12}$$

Donde  $r_1$  es el radio exterior de la pared cilíndrica por la que se realiza el intercambio de calor entre fluidos,  $r_2$  es su radio interior,  $h_i$  y  $h_o$  son los coeficientes individuales de transmisión de calor por convección interno y externo respectivamente.

Para los cálculos energéticos que se presentan a continuación, se han asumido las siguientes condiciones previas:

- 1.- U es constante en toda la superficie del intercambiador.
- 2.- El sistema es adiabático.
- 3.- Las temperaturas de los fluidos son constantes y se representan mediante el incremento de temperatura medio logarítmico.
- 4.- Los calores específicos de los fluidos son también constantes.

### **27.3.- Determinación del coeficiente global de transferencia de calor**

---

La determinación teórica, sobre el papel, del valor de U para el cálculo y diseño de MEPA utilizado no es inmediata y entran en juego una gran cantidad de variables que deben ser consideradas. A continuación se presenta un procedimiento para la determinación teórica del coeficiente global de transferencia de calor, a partir del desarrollo y aplicación de la fórmula presentada en el apartado primero para el caso de un intercambiador de calor de pared cilíndrica:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2 / r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} \quad \text{Ec. 27.12}$$

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + R_i \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2 / r_1)}{k} + R_o + \frac{1}{h_o}\right)} \quad \text{Ec.27.12.1}$$

Con anterioridad a la determinación del coeficiente global de transmisión del calor (U), deben conocerse los valores de los coeficientes individuales de transmisión del calor por convección a uno y otro lado de la pared ( $h_i$  y  $h_o$ ), para lo que existen distintas opciones: Unas proponen la estimación de los valores a partir de datos tabulados y otras proponen el cálculo mediante correlaciones, como es el caso de algunas de las más conocidas: Chen, Shah, Kandilkar, Kern.

En el caso que se plantea, y con el objetivo de sintetizar los cálculos, se ha trabajado con las propuestas de cálculo de aquellos autores que se consideran más ajustados a las condiciones y particularidades de la experimentación realizada. Así, se ha calculado U utilizando dos propuestas que utilizan valores tabulados como son las realizadas por Kreith, 1999 y Kakaç, 1997, y también utilizando otras tres propuestas que se sirven de correlaciones experimentales para la determinación de los valores de los coeficientes de transmisión del calor por convección a uno y otro lado de la pared, como son: Kern, D.Q. 1990 y Muñoz, E; Corrochano, C. 1998 y Chen – Edelstein 1984.

Para el cálculo de estos dos valores se han tomado las siguientes ecuaciones, para cada uno de los casos estimados, que se detallan a continuación:

- Muñoz y Corrochano, 1998
- Kreith, 1999
- Kakaç, 1997
- Kern, 1990
- Chen y Edelstein, 1984

**Muñoz y Corrochano, 1998**

Que establecen en su anexo nº4 “Prontuario” las bases para el cálculo de los coeficientes individuales de transmisión de calor :

**Convección forzada:**

Flujo laminar:

$$Nu_D = 1,86 \left[ \left( \frac{D}{L} \right) Re_D \cdot Pr \right]^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \leftrightarrow 0,48 \langle Pr \rangle 16700 \dots\dots \quad \text{Ec. 27.13}$$

Flujo turbulento: (idem p.404, 405)

$$Nu_D = 0,023 Re_D^{0,8} \cdot Pr^n \leftrightarrow 10^4 \langle Re \rangle 10^6 \quad \text{Ec. 27.7}$$

$$Nu_D = 0,027 Re_D^{0,8} \cdot Pr^{1/3} \leftrightarrow 2300 \langle Re \rangle 10^4 \quad \text{Ec. 27.8}$$

En espacios anulares:

$$Nu_{DE} = 0,023 Re_{DE}^{0,8} \cdot Pr^n \leftrightarrow DE = (D_2 - D_1)$$

$$n = 0,3 \rightarrow \text{enfriamiento} \quad \text{Ec. 27.7}$$

$$n = 0,4 \rightarrow \text{calentamiento}$$

En carcasa con multitubos:

$$Nu = 0,36 (Re)^{0,55} (Pr)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad \text{Ec. 27.14}$$

donde

$$DE = \frac{4P^2}{\pi \cdot De} - De \rightarrow \text{cuadrada}$$

$$DE = \frac{3,468 \cdot P^2}{\pi \cdot De} - De \rightarrow \text{triangular}$$

Pérdida de carga en el interior de los tubos:

$$\Delta P = \frac{G_t^2}{\rho \cdot g} \cdot Pr \cdot \left[ \frac{f_i}{D_i} + 2 \right] \cdot \frac{1}{10000} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad \text{Ec. 27.15}$$

$$f_i = 0,0028 + 0,25 (Re)^{-0,32} \quad \text{Ec. 27.16}$$

Donde  $f_i$  es el factor lineal de pérdida de carga.

**Kreith, 1999**

Que propone el uso de tablas para la estimación de los valores de  $h_o$  y  $h_i$  con lo que ya se puede determinar sin problemas el valor de  $U$  (Ver tabla 28.2).

**Kakaç, 1997**

Que propone también la utilización de tablas para la determinación aproximada de los valores de  $h_o$  y  $h_i$  además de proporcionar también una pequeña tabla en la que se muestran algunos valores tabulados de  $U$  (Ver tabla 28.3).

**Kern, 1990**

La correlación de Kern para el caso de evaporadores de carcasa y tubos (Kakaç, 1997 y otros), para la determinación del coeficiente de transmisión del calor por convección en el lado de la carcasa, se expresa de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{h_o D_e}{k} = 0,36 \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)^{0,55} \cdot \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right) \quad \text{Ec. 27.17}$$

para números de Reynolds entre 2000 y  $10^6$ .

**Chen 1966 y Edelstein 1984**

Estos dos investigadores proponen la utilización de la siguiente expresión matemática para el caso particular del cálculo del coeficiente de transmisión del calor por convección en una película líquida que no cambia de fase durante el periodo de transmisión.

$$h_{sp} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \frac{k}{D_h} \quad \text{Ec. 27.18}$$

Donde  $D_h$  es el diámetro equivalente.

Teniendo en cuenta las consideraciones teóricas anteriormente descritas se está en condiciones de realizar los cálculos energéticos que a continuación se presentan, para cada uno de los montajes ensayados, en sus apartados correspondientes.

## 28.- Estudio energético del MEPA #1

El presente apartado se ha dividido en dos secciones en las cuales se presentan los cálculos y resultados del estudio energético relativo al intercambiador de columna recta fabricado en vidrio y acero respectivamente.

Asimismo, la primera sección presenta dos subsecciones en las que se presentan respectivamente los cálculos y determinaciones teóricas y experimentales relativas a la energética del intercambiador de columna recta.

### 28.1.- Estudio energético del intercambiador de columna recta en vidrio

#### 28.1.1.- Determinaciones energéticas teóricas en el intercambiador de columna recta

Para poder realizar en profundidad un estudio energético riguroso sobre el funcionamiento en las condiciones más habituales en las que se han desarrollado los ensayos de laboratorio, es necesario conocer los siguientes datos previos relativos al intercambiador de columna recta simple.

Tabla 28.1.- Datos previos intercambiador columna recta

<i>Concepto</i>	<i>Valor</i>	<i>Concepto</i>	<i>Valor</i>
<i>Longitud del intercambiador</i>	1,60 m	<i>K vidrio</i>	0,8W/m°C
<i>Diámetro interior tubo interior</i>	1,1 cm	<i>Re</i>	3211
<i>Diámetro exterior tubo interior</i>	1,5 cm	<i>c</i>	4185 J/Kg °C
<i>Diámetro interior tubo exterior</i>	3,1 cm	<i>μ calefacción</i>	4,31·10 <sup>-4</sup> Kg/m·s
<i>Diámetro exterior tubo ext.</i>	3,5 cm	<i>μ ebullición</i>	2,85·10 <sup>-4</sup> Kg/m·s
<i>Caudal de calefacción</i>	3 l/min	<i>Pr calefacción</i>	2,72
<i>Temp. entrada alimento</i>	15-18°C	<i>Temp.Entrada calefacc.</i>	65 °C
<i>Temp. salida alimento</i>	53-54°C	<i>Temp. Salida calefacción</i>	60°C

Determinación de U según Kreith, 1999.

De las tablas que el autor presenta, se extraen los siguientes valores promedio para las condiciones habituales de funcionamiento del aparato evaporador de película ascendente con intercambiador de columna recta vertical:

Tabla 28.2.- Valores habituales de los coeficientes de transmisión por convección y de ensuciamiento en evaporadores. Kreith, F. 1999

Concepto	Valor
$h_i$ (Coef. Transmisión del lado interno)	6.500 W/m <sup>2</sup> °C
$h_o$ (Coef. Transmisión del lado externo)	6.250 W/m <sup>2</sup> °C
$R_i$ (Resistencia por ensuciamiento interno)	1,5·10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> °C/W
$R_o$ (Resistencia por ensuciamiento externo)	1,75·10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> °C/W

Aplicando la fórmula general para la determinación de  $U_o$  (Ec. 26.12) para el caso de un tubo cilíndrico, los resultados que se obtienen son los siguientes:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 305,11 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad (\text{en el caso de no considerar los factores de ensuciamiento})$$

Ec. 27.12

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + R_i \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + R_o + \frac{1}{h_o}\right)} = 273,44 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad (\text{en el caso de considerar los factores de ensuciamiento})$$

Ec. 27.12.1

Determinación de U según Kakaç, 1997.

Pueden extraerse, de las tablas que el autor presenta, los siguientes valores promedio para su utilización en la determinación del coeficiente global de transmisión de calor:

Tabla 28.3.- Valores habituales de coeficientes de transmisión por convección para evaporadores. Kakaç, S. 1998.

Concepto	Valor
$h_i$ (Coef. Transmisión del lado interno)	7.500 W/m <sup>2</sup> °C
$h_o$ (Coef. Transmisión del lado externo)	6.250 W/m <sup>2</sup> °C

Del mismo modo que en el caso anterior, aplicando la fórmula general para la determinación de U para el caso de un tubo cilíndrico, el resultado que se obtiene es el siguiente:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 307,74 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

#### Determinación de U según Kern, 1990.

Conociendo la correlación que Kern propone para la determinación de los coeficientes de transmisión del calor del lado interior y exterior ( $h_i$ ,  $h_o$ ):

$$Nu = \frac{h_o D_e}{k} = 0.36 \left(\frac{D_e \cdot G_s}{\mu}\right)^{0.55} \cdot \left(\frac{c_p \cdot \mu}{k}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right) \quad \text{Ec. 27.17}$$

Asumiendo que :

$$De = \frac{4 \cdot \text{Areaanular}}{Pm} \quad \text{Ec. 27.18.1}$$

Donde Area anular es el área de la corona circular por el que fluye el líquido calefactor y Pm es el perímetro mojado de dicha sección. Además, se sabe que:

$$Re = \left(\frac{D_e \cdot G_s}{\mu}\right) = 3211 \quad \text{Ec. 27.19}$$

$$Pr = \left(\frac{c_p \cdot \mu}{k}\right) = 2,72 \quad \text{Ec. 27.2}$$

De la resolución de dicha correlación se tiene que:

$$h_o = 1164,44 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$h_i$  = no puede determinarse por desconocerse algunos de los parámetros necesarios para su cálculo ( $G$ , principalmente). Se considera que  $h_i$  es comparativamente mucho más elevado que  $h_o$  y, por lo tanto, se estiman válidos los valores que diversos autores tabulan para este coeficiente (Kakaç, S 1998, Kreith, F 1999 entre otros). Así, se estima:

$$h_i = 6.500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 251,49 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

#### Determinación de U según Muñoz, E; Corrochano, C. 1998.

Para regímenes no laminares, como se sabe que son ambos flujos tanto el exterior como el interior al tubo, los autores proponen la siguiente correlación:

$$Nu_D = 0,027 Re_D^{0,8} Pr^{1/3} \leftrightarrow 2300(Re(10^4)) \quad \text{Ec. 27.8 Dittus-Boelter}$$

Con lo que teniendo en cuenta los parámetros que se exigen, se tiene que:

$$h_o = 844,37 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Con lo que :

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 232,46 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

#### Determinación según Chen 1966 y Edelstein 1984.

Para el caso particular que nos ocupa, la expresión de la correlación de Muñoz y Corrochano anteriormente descrita coincide con la presente de Chen y Edelstein, con lo que el valor de  $U_o$  que se obtiene de ambas es el mismo.

$$h_{sp} = 0,023 \cdot \text{Re}^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} \frac{k}{Dh} \quad \text{Ec. 27.18}$$

De esta expresión se obtiene directamente el valor de  $h_o$  en el caso de un compuesto que no cambia de fase en su paso por el intercambiador de calor. Así:

$$h_o = 905,63 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Y con esto:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 236,87 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

### 27.1.2.- Determinaciones experimentales en el intercambiador de columna recta en vidrio

Utilizando la expresión de la temperatura media logarítmica ( $\Delta T_{ml}$ ), y conociendo los datos preliminares necesarios para la determinación que se pretende, se tiene que:

$$Q_{transmitido} = A_o \cdot U_o \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Ec. 27.20}$$

$$Q_{calef} = m_c \cdot c_p \cdot \Delta T_c \quad \text{Ec. 27.21}$$

$$Q_{disolucion} = m_d \cdot c_p \cdot \Delta T_d + m_d \cdot c_v \quad \text{Ec. 27.22}$$

Donde  $Q_{transmitido}$  es el calor que pasa de un fluido a otro a través de la pared cilíndrica del intercambiador,  $Q_{calef}$  es el calor que pierde el agua de calefacción y  $Q_{disolucion}$  es el calor que gana el líquido alimento en el interior del intercambiador puesto que una de las condiciones asumidas es la de trabajar con un sistema adiabático.

Para poder determinar experimentalmente el valor del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_o$ ) debe conocerse primero la temperatura media logarítmica, que responde a la expresión siguiente:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{50 - 7}{\ln\left(\frac{50}{7}\right)} = 21,87^\circ C \quad \text{Ec. 27.23}$$

Sabiendo que el caudal promedio destilado es de 1l/h y sustituyendo en las expresiones anteriores se tiene que, despejando  $U_o$  del resultado de igualar las ecuaciones 27.20 y 27.22:

$$A_o = 2\pi R_o \cdot L = 2\pi 0,0075 \cdot 1,60 = 0,0754 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 27.24}$$

$$Q_{disolucion} = m_d \cdot c_p \cdot \Delta T_d + m_d \cdot c_v = 2,77 \cdot 10^{-4} \cdot (4178 \cdot 38 + 2,26 \cdot 10^6) = 671,97 \text{ W} \quad \text{Ec. 27.22}$$

$$Q_{transmitido} = A_o \cdot U_o \cdot \Delta T_{ml} \rightarrow U_o = \frac{671,97}{0,0754 \cdot 21,87} = 407,50 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.20}$$

Además, se puede determinar directamente el calor transferido por el líquido calefactor:

$$Q_{calef} = m_c \cdot c_p \cdot \Delta T_c = 0,05 \cdot 4185 \cdot 5 = 1046,25 \text{ W} \quad \text{Ec. 27.21}$$

Con lo que las pérdidas en el sistema ensayado pueden determinarse de la siguiente manera:

$$\Delta Q = \frac{Q_{disolucion} - Q_{calef}}{Q_{calef}} \cdot 100 = \frac{1046 - 671,97}{1046} \cdot 100 = 35,77 \% \quad \text{Ec. 27.25}$$

Con lo que el rendimiento energético del proceso intercambiador de calor será de:

$$R_{dto} = 64,22 \%$$

## 28.2.- Estimación energética del intercambiador de columna simple en acero inox.

Se ha considerado interesante incluir los cálculos y resultados del estudio energético para el MEPA #1 en el caso particular de utilizar acero como material de diseño y construcción del intercambiador. Con ello se pretende aproximar la labor investigadora y los cálculos realizados a escala de laboratorio, a la modelización a escala industrial del problema estudiado, ya que habitualmente los intercambiadores de calor de tipo industrial son diseñados y construidos en acero.

En la realización del estudio energético del intercambiador de calor de columna simple vertical, compuesta por un doble tubo concéntrico, fabricada en este material metálico, se han realizado esencialmente los mismos cálculos teóricos que en la sección anterior del presente apartado. Para la determinación del coeficiente global de transmisión del calor ( $U_o$ ) en este caso en el que el intercambiador es de acero, la única modificación que se ha realizado, si bien es de capital importancia, es la consideración del coeficiente de transmisión del calor por conducción de dicho metal, que responde al siguiente valor:

$$K_{\text{acero}} = 15 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}.$$

Se asume que el cambio de material puede afectar a los valores de otros términos energéticos que entran en juego en la determinación del coeficiente global de transferencia de calor, pero se consideran despreciables al lado del importante cambio que supone trabajar térmicamente con acero frente a hacerlo con vidrio especialmente desde el punto de vista del diferente coeficiente de conducción térmica de estos materiales. Es por esto por lo que se han mantenido constantes los demás factores necesarios para la determinación energética deseada, modificando únicamente el valor de  $k$ .

Con esto, se presentan a continuación los cálculos y resultados correspondientes al intercambiador de columna simple fabricada en acero, para su aproximación al caso real:

**INTERCAMBIADOR DE COLUMNA RECTA VERTICAL DE ACERO INOX**

DATOS PRELIMINARES:

L=	1,6 m	Cond material	15 W/m <sup>2</sup> ·°C
Sup contacto	0,0753984 m <sup>2</sup>		
<b>Tubo interior</b>		<b>Tubo Exterior</b>	
Radio interior	0,0055 m	Radio interior	0,0155 m
Radio exterior	0,0075 m	Radio exterior	0,0175 m

LÍQUIDO DESTILADO		LÍQUIDO DE CALEFACCIÓN	
T <sup>a</sup> entrada	53 °C	T <sup>a</sup> entrada	65 °C
T <sup>a</sup> salida	15 °C	T <sup>a</sup> salida	60 °C
μ	0,000431 Kg/m·s	μ	0,000431 Kg/m·s
μ boil	0,000285 Kg/m·s	μ boil	0,000285 Kg/m·s
K conduct	0,611 W/m <sup>2</sup> ·°C	K conduct	0,661 W/m <sup>2</sup> ·°C
Caudal	1 l/h	Caudal	3 l/min
n° Pr	5,9	n° Pr	2,72

Kreith, 1999			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> ·°C	Rfi=	0,00015 m <sup>2</sup> ·°C/W
ho=	6250 W/m <sup>2</sup> ·°C	Rfo=	0,000175 m <sup>2</sup> ·°C/W
Uo=	1905,24212 W/m <sup>2</sup> ·°C		
Uo=	1105,68939 W/m <sup>2</sup> ·°C		

Kakaç, 1997	
hi=	7500 W/m <sup>2</sup> ·°C
ho=	6250 W/m <sup>2</sup> ·°C
Uo=	2012,494994 W/m <sup>2</sup> ·°C

Kern, 1990			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> ·°C		
Sección=	0,000578054 m <sup>2</sup>	Nu=	28,1861487
De=	0,016 m		
Re=	3211,027356	ho=	1164,44027 W/m <sup>2</sup> ·°C
Uo=	817,2275623 W/m <sup>2</sup> ·°C		

Muñoz y Corrochano, 1998			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> ·°C	para espacios anulares	
Re=	3211,027356	Nu=	20,5000295
Pr=	2,72	ho=	846,907468 W/m <sup>2</sup> ·°C
Uo=	646,9836079 W/m <sup>2</sup> ·°C		

Chen 1966 y Edelstein 1984			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> ·°C		
Re=	3211,027356	ho=	905,632666 W/m <sup>2</sup> ·°C
Pr=	2,72		
Uo=	680,7036253 W/m <sup>2</sup> ·°C		

## 29.- Estudio energético del MEPA #2

La realización del estudio energético del Evaporador de Película Ascendente mediante intercambiador de doble columna en espiral presenta algunas particularidades que lo hacen sensiblemente diferente del estudio energético realizado para el caso anterior en el que se utilizaba un intercambiador de columna recta vertical. Así, en el presente caso, el hecho de disponer de una doble columna arrollada en espiral supone ya de por sí una variación considerable de las características y funcionamiento interno del intercambiador.

### 29.1.- Estudio energético del intercambiador de doble columna en espiral en vidrio

#### 29.1.1.- Determinaciones energéticas teóricas en el intercambiador de doble columna en espiral de vidrio

A continuación se presentan los datos preliminares necesarios para la realización del estudio energético teórico, relativos a las propiedades del intercambiador de doble columna en espiral.

Tabla 29.1.- Datos previos del intercambiador de doble columna en espiral

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>	<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
<i>Longitud intercambiador</i>	60 cm·2 uds	<i>K vidrio</i>	0,8W/m°C
<i>Diámetro int. tubo interior</i>	0,3 cm	<i>Re</i>	820,6
<i>Diámetro ext. tubo interior</i>	0,5 cm	<i>c</i>	4185 J/Kg °C
<i>Diámetro int. tubo exterior</i>	5,0 cm	<i>μ calefacción</i>	4,31·10 <sup>-4</sup> Kg/m·s
<i>Diám. ext. tubo exterior</i>	5,5 cm	<i>μ ebullición</i>	2,85·10 <sup>-4</sup> Kg/m·s
<i>Caudal de calefacción</i>	3 l/min	<i>Pr calefacción</i>	2,72
<i>Temp. entrada alimento</i>	15-18°C	<i>Temp. Entrada calefac</i>	65°C
<i>Temp. salida alimento</i>	53-54°C	<i>Temp. Salida calefac.</i>	60°C

#### Determinación de U según Kreith, 1999.

El autor no presenta diferenciación alguna para el caso de una columna arrollada en espiral por lo que, para la determinación del coeficiente global de transmisión de calor,

de las tablas que el autor presenta en las p. 4. 90-91 y 4. 106-109, se extraen los mismos valores promedio para las condiciones habituales de funcionamiento que en el caso del MEPA #1:

Tabla 29.2.- Valores habituales de los coeficientes de transmisión por convección y de ensuciamiento en evaporadores. Kreith, F. 1999

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
<i><math>h_i</math> (Coef. Transmisión del lado interno)</i>	6.500 W/m <sup>2</sup> °C
<i><math>h_o</math> (Coef. Transmisión del lado externo)</i>	6.250 W/m <sup>2</sup> °C
<i><math>R_i</math> (Resistencia por ensuciamiento interno)</i>	1,5·10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> °C/W
<i><math>R_o</math> (Resistencia por ensuciamiento externo)</i>	1,75·10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> °C/W

Aplicando la fórmula general para la determinación de  $U_o$ , los resultados que se obtienen son los siguientes:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 496,83 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad (\text{en el caso de no considerar los factores de ensuciamiento})$$

Ec. 27.12

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + R_i \frac{r_2}{r_1} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + R_o + \frac{1}{h_o}\right)} = 410,21 \text{ W/m}^2 \text{ °C} \quad (\text{en el caso de considerar los factores de ensuciamiento})$$

Ec. 27.12.1

Determinación de U según Kakaç, 1997.

Lo mismo ocurre en el cálculo de  $U_o$  global propuesto por Kakaç: de donde pueden extraerse los siguientes valores promedio:

Tabla 29.3.- Valores habituales de coeficientes de transmisión por convección para evaporadores. Kakaç, S. 1998

<b>Concepto</b>	<b>Valor</b>
<i><math>h_i</math> (Coef. Transmisión del lado interno)</i>	7.500 W/m <sup>2</sup> °C
<i><math>h_o</math> (Coef. Transmisión del lado externo)</i>	6.250 W/m <sup>2</sup> °C

Del mismo modo que en el caso anterior, aplicando la fórmula general para la determinación de U, se obtiene:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 505,42 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

Determinación de U según Kern, 1990.

Conociendo la correlación que Kern propone para la determinación de los coeficientes de transmisión del calor del lado interior y exterior ( $h_i$ ,  $h_o$ ):

$$Nu = \frac{h_o D_e}{k} = 0.36 \left( \frac{D_e \cdot G_s}{\mu} \right)^{0.55} \cdot \left( \frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^{1/3} \cdot \left( \frac{\mu_b}{\mu_w} \right) \quad \text{Ec. 27.17}$$

Asumiendo, dado que el intercambiador consta dos tubos, que :

$$S = 2 \cdot \sum \pi r^2 = \pi(0,02^2 - 0,015^2 + 0,01^2) \cdot 2 = 1,728 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 27.26}$$

$$Pm = 2 \cdot \sum 2\pi r = 2 \cdot \pi(0,025 + 0,0166 + 0,01166) = 0,565 \text{ m} \quad \text{Ec. 27.27}$$

$$De = \frac{4 \cdot S}{Pm} = 1,222 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad \text{Ec. 27.18.1}$$

Donde S es, en este caso particular, el área de la corona circular por el que fluye el líquido calefactor y Pm es el perímetro mojado de dicha sección, y considerando además que la disposición del intercambiador es de doble columna en espiral.

En este caso particular debe destacarse que el flujo del líquido calefactor es de tipo LAMINAR lo que supone una disminución efectiva de la transmisión de calor frente al tipo de flujo más habitual que es el turbulento. Así:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot De}{\mu} = 820,59 \text{ (adim)}. \quad \text{Ec. 27.19}$$

De la resolución de dicha correlación se tiene que:

$$h_o = 719,78 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$h_i$  = no puede determinarse por desconocerse algunos de los parámetros necesarios para su cálculo ( $G$ , principalmente). Se considera que  $h_i$  es comparativamente mucho más elevado que  $h_o$  y que puede asumirse un valor de los tabulados por varios autores. Así:

$$h_i = 6.500 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 308,44 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

#### Determinación de U según Muñoz, E; Corrochano, C. 1998.

Para un régimen LAMINAR, como se sabe que es el flujo exterior al tubo, los autores proponen la siguiente correlación:

$$NuD = 1,86 \left[ \left( \frac{D}{L} \right) Re_D * Pr \right]^{1/3} * \left( \frac{\mu}{\mu_s} \right)^{0,14} \leftrightarrow 0,48 < Pr < 16.700 \dots \quad \text{Ec. 27.13}$$

Donde  $D$  será el diámetro equivalente de la sección de paso del líquido caliente que en este caso será el mismo valor determinado en el proceso anterior:

$$De = \frac{4 \cdot S}{Pm} = 1,222 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad \text{Ec. 27.18.1}$$

Con lo que teniendo en cuenta los parámetros que se exigen, se tiene que:

$$h_o = 268,65 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Y con ello:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 179,37 \text{ W/m}^2\text{°C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

#### Determinación según Chen 1966 y Edelstein 1984.

$$h_{sp} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \frac{k}{Dh} \quad \text{Ec. 27.18}$$

Expresión de la que se obtiene directamente el valor de  $h_o$  en el caso de un compuesto que no cambia de fase en su paso por el intercambiador de calor. Así:

$$h_o = 398,02 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Y con esto:

$$U_o = \frac{1}{\left(\frac{r_2}{r_1 h_i} + \frac{r_2 \ln(r_2/r_1)}{k} + \frac{1}{h_o}\right)} = 229,08 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.12}$$

### 29.1.2.- Determinaciones energéticas experimentales en el intercambiador de doble columna en espiral de vidrio

Utilizando la expresión de la temperatura media logarítmica, y conociendo los datos preliminares necesarios para la determinación que se pretende, se tiene que:

$$Q_{transmitido} = A_o \cdot U_o \cdot \Delta T_{ml} \quad \text{Ec. 27.20}$$

$$Q_{calef} = m_c \cdot c_p \cdot \Delta T_c \quad \text{Ec. 27.21}$$

$$Q_{disolucion} = m_d \cdot c_p \cdot \Delta T_d + m_d \cdot c_v \quad \text{Ec. 27.22}$$

Para poder determinar experimentalmente el valor del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_o$ ) debe conocerse primero los valores correspondientes a la temperatura media logarítmica, el radio medio logarítmico y la longitud total de la espiral, que responden a las expresiones siguientes:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} = \frac{50 - 7}{\ln\left(\frac{50}{7}\right)} = 21,87^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.24}$$

$$R_{ml} = \frac{R_2 - R_1}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \frac{0,015 - 0,01}{\ln\left(\frac{0,015}{0,01}\right)} = 1,233 \cdot 10^{-2} \text{ m} \quad \text{Ec. 27.28}$$

$$L_{tot} = N \cdot V \cdot \sqrt{(2\pi R_{ml})^2 + h^2} = 4 \cdot 18 \cdot \sqrt{(2\pi \cdot 0,0123)^2 + 0,0155^2} = 5,69 \text{ m} \quad \text{Ec. 27.29}$$

Donde “N” es el número de serpentines (dos por tubo), “V” es el número de vueltas que da cada serpentín, “ $R_{ml}$ ” es el radio promedio del serpentín visto en planta y “h” es la

altura que gana el serpentín a cada vuelta. Así, el área media logarítmica del conjunto de serpentines queda del siguiente modo:

$$A_o = 2\pi \cdot R_o \cdot Ltot = 0,069 \text{ m}^2 \quad \text{Ec. 27.30}$$

Sabiendo que el caudal destilado obtenido es de 0,75 l/h y sustituyendo en las expresiones anteriores se tiene que:

$$Q_{disolucion} = m_d \cdot c_p \cdot \Delta T_d + m_d \cdot c_v = 2,083 \cdot 10^{-4} \cdot (4178 \cdot 38 + 2,26 \cdot 10^6) = 503,91 \text{ W} \quad \text{Ec. 27.22}$$

$$Q_{transmitido} = A_o \cdot U \cdot \Delta T_{ml} \rightarrow U_o = \frac{477}{0,069 \cdot 21,87} = 331,58 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \text{Ec. 27.20}$$

Además, se puede determinar el calor transferido por el líquido calefactor:

$$Q_{calef} = m_c \cdot c_p \cdot \Delta T_c = 0,05 \cdot 4185 \cdot 5 = 1046,25 \text{ W} \quad \text{Ec. 27.21}$$

Con lo que las pérdidas en el sistema ensayado pueden determinarse de la siguiente manera:

$$\Delta Q = \frac{Q_{disolucion} - Q_{calef}}{Q_{calef}} \cdot 100 = \frac{1046 - 477}{1046} \cdot 100 = 51,84 \% \quad \text{Ec. 27.25}$$

Con lo que el rendimiento del proceso intercambiador de calor es:

$$\text{Rdto} = 48,16 \%$$

### 30.2.- Estimación energética del intercambiador de doble columna en espiral en acero inox.

Al igual que para el caso del cálculo energético del MEPA #1, se considera interesante realizar una aproximación a la energética a escala industrial de un intercambiador de doble columna en espiral. Para ello se repiten en este apartado los cálculos anteriormente realizados así como los resultados para el MEPA #2 en el supuesto de

haber sido diseñado en acero, como usualmente ocurre en los intercambiadores de tipo industrial.

Así, para la realización del estudio energético del intercambiador de doble columna en espiral fabricado en este metal, se han mantenido esencialmente todas las características que definían el intercambiador anteriormente calculado fabricado en vidrio. El único cambio que se ha realizado en las condiciones y datos de partida de estos cálculos es el de la variación del valor del Coeficiente de transmisión del calor por conducción, que en este caso adquiere el siguiente valor:

$$K_{\text{acero}} = 15 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$$

Con ello se tienen, de manera sintetizada, los siguientes cálculos y resultados mostrados en la hoja de cálculo Excel que se presenta:

## INTERCAMBIADOR DE DOBLE COLUMNA EN ESPIRAL DE ACERO INOX

DATOS PRELIMINARES:

L tubo int=	5,689191854 m	Cond material	15 W/m <sup>2</sup> .°C	<b>Sección transversal</b>	
L carcasa=	1,2 m	N°serpentes	4 Uds		
Vueltas/serpe	18 Uds	Sup contacto	0,06997756 m <sup>2</sup>		
Altura/vuelta	0,0155 m	Rml	0,01233152 m		
<b>Tubo interior</b>		<b>Tubo Exterior</b>		Radio exte	0,02 m
Radio interior	0,0015 m	Radio interior	0,02 m	Radio mec	0,015 m
Radio exterior	0,0025 m	Radio exterior	0,035 m	Radio inte	0,01 m

LIQUIDO DESTILADO		LIQUIDO DE CALEFACCION	
T <sup>a</sup> entrada	53 °C	T <sup>a</sup> entrada	65 °C
T <sup>a</sup> salida	15 °C	T <sup>a</sup> salida	60 °C
μ	0,000431 Kg/m·s	μ	0,000431 Kg/m·s
μ boil	0,000285 Kg/m·s	μ boil	0,000285 Kg/m·s
K conduct	0,611 W/m <sup>2</sup> .°C	K conduct	0,661 W/m <sup>2</sup> .°C
Caudal	1 l/h	Caudal	3 l/min
n° Pr	5,9	n° Pr	2,72

Kreith, 1999			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> .°C	Rfi=	0,00015 m <sup>2</sup> .°C/W
ho=	6250 W/m <sup>2</sup> .°C	Rfo=	0,000175 m <sup>2</sup> .°C/W
Uo=	1993,827666 W/m <sup>2</sup> .°C		
Uo=	1079,275063 W/m <sup>2</sup> .°C		

Kakaç, 1997	
hi=	7500 W/m <sup>2</sup> .°C
ho=	6250 W/m <sup>2</sup> .°C
Uo=	2139,678988 W/m <sup>2</sup> .°C

Kern, 1990			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> .°C		
Sección=	0,00086394 m <sup>2</sup>	Nu=	13,309222
P.M.=	0,282744 m		
De=	0,012222222 m		
Re=	820,59588	ho=	719,786923 W/m <sup>2</sup> .°C
Uo=	577,7515173 W/m <sup>2</sup> .°C		

Muñoz y Corrochano, 1998			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> .°C	para flujo laminar	
Re=	820,59588	Nu=	4,96746222
Pr=	2,72	ho=	268,649389 W/m <sup>2</sup> .°C
Uo=	246,070766 W/m <sup>2</sup> .°C		

Chen 1966 y Edelstein 1984			
hi=	6500 W/m <sup>2</sup> .°C		
Re=	820,59588	ho=	398,024813 W/m <sup>2</sup> .°C
Pr=	2,72		
Uo=	350,3910666 W/m <sup>2</sup> .°C		

### 30.- Síntesis de los resultados energéticos obtenidos

A continuación, para facilitar la interpretación de los datos y resultados obtenidos de los cálculos detallados en los apartados anteriores relativos al cálculo energético de las distintas modalidades MEPA diseñadas y ensayadas, se presentan éstos de forma tabulada.

Tras la tabla que se muestra, se presenta un breve análisis de los mismos que ayude a su comprensión y sirva de base para la extracción de las conclusiones pertinentes sobre la energética del sistema, que serán presentadas en el Capítulo X de la presente Tesis Doctoral.

Tabla 30.1.- Síntesis de resultados de los cálculos energéticos. Valores del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_o$ )

$W/m^2\text{ }^\circ C$	Tipo de intercambiador de calor			
	Columna recta		Doble columna espiral	
<i>Cálculos según</i>	Vidrio	Acero inox	Vidrio	Acero inox
<i>Kreith</i>	305,11	1905,24	496,83	1993,83
	273,44	1105,69	410,21	1079,27
<i>Kakaç</i>	307,74	2012,49	505,42	2139,68
<i>Kern</i>	251,49	817,23	308,44	577,75
<i>Muñoz y Corrochano</i>	232,46	646,98	179,37	246,07
<i>Chen y Edelstein</i>	236,87	680,70	229,08	350,39
<b>Valores experimentales</b>	<b>407,50</b>		<b>311,58</b>	

#### Análisis de los resultados expuestos:

- Los valores del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_o$ ) obtenidos por los distintos procedimientos de determinación empleados se encuentran en un rango que oscila entre 163,9 y 407,5 para el intercambiador de columna recta fabricada en vidrio, entre 680,7 y 2012,5 para la columna recta fabricada en acero inox., entre 179,4 y 513,2 para la doble columna en espiral fabricada en vidrio y entre 246,1 y 2139,7 para la doble columna en espiral fabricada en acero inox. Siendo todos estos valores expresados en  $W/m^2\text{ }^\circ C$ .
- Los valores del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_o$ ) obtenidos mediante determinaciones teóricas (bien por procedimientos tabulados como Kreith, F. 1995 y Kakaç, S. 1998 y por correlaciones como las de Kern, Muñoz

y Corrochano, Chen y Edelstein) son distintos de los obtenidos mediante procesos experimentales.

- Lo anteriormente afirmado es debido a las particulares condiciones de trabajo de los modelos ensayados en el laboratorio. Tras un profundo análisis de los motivos que generan esta distorsión de valores entre resultados se deduce que el régimen hidráulico influye fuertemente en los valores de los coeficientes  $h_i$  y  $h_o$  (coeficientes individuales de transmisión del calor por convección).

Esto se explica por la aparición de una fina lámina de líquido sobre la pared de los tubos cuyo grosor depende de la convección, que dificulta la transmisión de calor (a mayor convección menor espesor de la capa). Es por esto por lo que, a mayor caudal, mayor turbulencia y por lo tanto menor espesor de la capa de líquido sobre los tubos, lo que supone una mayor eficiencia en la transmisión térmica del sistema (Burmeister, 1993; Hesselgreaves, J.E, 2001; Levenspiel, O. 1993; Kreith, F. 1999. y otros.).

- Si se traslada la explicación anterior al caso concreto que nos ocupa se tiene que, debido a los regímenes hídricos empleados (que son quasi laminares), los cálculos para la determinación de los coeficientes  $h_i$  y  $h_o$  dan valores muy bajos de éstos. Este hecho supone que aparezcan diferencias entre los procesos basados en tablas (que no consideran esta particularidad puesto que trabajan con la suposición de disponer de flujos en régimen turbulento), los procesos en los que  $Re$  tiene un peso importante, y las determinaciones experimentales de  $h_i$  y  $h_o$ . Consecuentemente, la determinación de  $U_o$  por los distintos procedimientos empleados también reflejará estas diferencias.
- Las diferencias detectadas en los valores obtenidos de  $U_o$  por los distintos procedimientos utilizados para la determinación de este valor, reflejan un alejamiento de los resultados calculados mediante correlaciones respecto de aquellos determinados experimentalmente. Siendo especialmente importante en este caso la determinación experimental de dicho valor ( $U_o$ ). Esta diferencia, en general, se hace más evidente en el caso del cálculo de  $U_o$  para el intercambiador de doble columna en espiral. Esto es debido a que es en este caso donde se

tienen los valores de  $Re$  más bajos, inferiores a 2.300, lo que indica claramente la presencia de un régimen de circulación de tipo laminar.

- Considerando lo anteriormente afirmado, como los valores obtenidos de  $U_o$  por estas correlaciones son claramente diferentes del conjunto de determinaciones de  $U_o$  realizadas puede afirmarse que, para el caso estudiado, estas correlaciones pierden validez en la hipótesis de contar con un régimen hidráulico laminar en la corriente de calefacción del intercambiador. Esto es debido a que, para su determinación se emplean condiciones favorables de intercambio térmico y esto, en el caso de contar con un líquido como agente térmico, supone la asunción de regímenes de tipo turbulento y el caso real que nos ocupa dista considerablemente de esta condición de flujo.

Por otra parte, con los datos y resultados que se tienen se ha realizado un estudio comparativo sobre los caudales de destilado que se han recogido y los que deberían haberse obtenido de manera teórica en el caso de no existir pérdidas energéticas al exterior del sistema. Así, aplicando el método de cálculo experimental ya descrito, se llega a los siguientes resultados:

Tabla 30.2. Comparativa de caudales teóricos y experimentales

<i>L/h</i>	<i>Columna recta</i>	<i>Doble espiral</i>
<i>Caudales teóricos</i>	1,56	1,56
<i>Caudales experimentales</i>	1	0,75

Tabla que responde a las pérdidas de calor experimentadas en los ensayos realizados con las distintas configuraciones MEPA y que pueden verse agrupadas para su comparación en la siguiente:

Tabla 30.3.- Comparativa de pérdidas de calor en los montajes ensayados y rendimientos energéticos

<i>% (porcentajes)</i>	<i>Columna recta</i>	<i>Doble espiral</i>
<i>Pérdidas de calor</i>	35,77 %	51,84 %
<i>Rendimiento</i>	64,22 %	48,16 %



## ESTUDIO ECONÓMICO

---

IX

31. Consideraciones Previas	189
32. Economía del MEPA #1	191
33. Economía del MEPA #2	199
34. Comparación de la economía de los procedimientos utilizados	207



## 31.- Consideraciones Previas

---

La presentación de un estudio económico de la recuperación de vertidos contaminados por iones de metales pesados mediante procedimientos térmicos se justifica ampliamente en la consideración del marco general descrito en los apartados 13, 14 y 15 relativos al objeto, justificación y objetivos de la presente Tesis Doctoral.

En este capítulo se describen sintéticamente los resultados del estudio económico realizado sobre los procedimientos térmicos utilizados en la labor investigadora desarrollada para la recuperación de aguas contaminadas con iones de metales pesados. Con ellos se pretende demostrar, no sólo la validez técnica de los sistemas empleados en la descontaminación y su importante valor medioambiental sino también la competitividad económica de estos procedimientos térmicos de recuperación de aguas frente a otras de las tecnologías utilizadas actualmente en este ámbito.

Para la realización del estudio económico que se presenta en los siguientes apartados, se ha contado una serie de consideraciones previas que han servido de marco para el citado estudio y que son los siguientes.

- El estudio económico se ha realizado en base a los resultados energéticos mostrados en el bloque anterior, que han sido obtenidos de los resultados de la realización de ensayos en el laboratorio con distintas disoluciones y diferentes condiciones de uso, para las distintas configuraciones MEPA empleadas.
- Se ha realizado una extrapolación de los resultados obtenidos a escala de laboratorio para adecuar éstos a las exigencias de la escala industrial, teniéndose como límite en esta extrapolación los rendimientos máximos de los aparatos utilizados.
- En la extrapolación para la obtención de resultados a escala industrial, no se han considerado las economías de escala propias de estas aplicaciones por lo que, previsiblemente, los beneficios reales derivados de la puesta en marcha de una

planta a escala industrial sean ventajosos respecto a los obtenidos de la extrapolación realizada.

- En el estudio económico de las dos configuraciones MEPA básicas ensayadas, se ha tenido en cuenta el supuesto de disponibilidad de un agua caliente residual en cantidad suficiente, tal como se detalló en el capítulo V. Es por esto por lo que, en las determinaciones finales, no se va a considerar coste alguno en el estudio económico del aporte térmico a los MEPA ensayados.
- El coste de la energía eléctrica utilizada para el funcionamiento de los elementos que conforman el sistema se ha considerado de 0,06 €/KWh, que es un coste válido dentro del rango tarifario usualmente cobrado al sector industrial.

Una vez atendidas las consideraciones que arriba se detallan se ha subdividido el estudio económico en dos secciones, una para cada uno de los modos de funcionamiento ensayados en el MEPA. En primer lugar se realizan las determinaciones económicas para el intercambiador de columna recta atendiendo a los resultados energéticos obtenidos de su utilización y tras esto se presentan las determinaciones energéticas para el intercambiador de doble columna en espiral conforme a los mismos criterios.

Una vez realizados los estudios económicos para cada una de las configuraciones de funcionamiento utilizadas para los ensayos con el MEPA, se presenta un apartado de síntesis en el que se recogen los datos más relevantes de estos estudios.

Con lo anteriormente citado, además de demostrar la validez económica del sistema, se da un paso más en el objetivo del ahorro de agua en la industria y en el cierre de los ciclos hidráulicos en este sector, colaborando, aunque sea modestamente, en la filosofía solidaria del ahorro de agua y en evitar un uso poco eficiente de este recurso.

## 32.- Economía del MEPA #1

En el presente apartado se describe el estudio económico realizado sobre el MEPA en su configuración con intercambiador de columna recta vertical, en consideración de los ensayos en él realizados y las determinaciones energéticas que se han descrito con anterioridad.

Así, para los condicionantes de funcionamiento con los que se ha trabajado, de entre los cuales destacan significativamente los que se detallarán a continuación, se tienen los resultados económicos que se muestran en el presente apartado.

Se ha trabajado con un sistema de aporte térmico que físicamente ha consistido en un calefactor de 1500W de potencia y un sistema de impulsión que se hizo trabajar dando un caudal de 3 l/min. El calefactor se tuvo en funcionamiento el 50% del tiempo de duración de los ensayos, por lo que este porcentaje se aplicará en los cálculos económicos que se presentan en este capítulo.

Asimismo se ha utilizado un sistema de vacío compuesto por diferentes bombas de vacío y las necesarias llaves y conductos para la transmisión de la presión de vacío generada al sistema. Las bombas de vacío con las que se ha trabajado en la determinación económica han sido: una bomba TELSTAR RD-18, una bomba TELSTAR S-4 y, por último, una bomba KNF Neuberger N035.3. Con todo ello, los datos básicos de partida para la realización de las determinaciones económicas son los que quedan reflejados en la tabla 32.1.

Tabla 32.1.- Datos de partida de las consideraciones económicas MEPA #1

<b>Consideraciones económicas MEPA #1</b>	
<b>Caudal destilado</b>	1 l/h
<b>Bombas</b>	
<b>TELSTAR RD-18</b>	750 W y 20 m <sup>3</sup> /h
<b>TELSTAR S-4</b>	150 W y 1,8 m <sup>3</sup> /h
<b>KNF N035.3</b>	200 W y 4 m <sup>3</sup> /h
<b>Sistema calefactor</b>	1500 W y 3 l/min
<b>Precio del KWh</b>	0,06 €/Kwh

### 32.1.- Determinaciones económicas preliminares.

Con todo esto, los datos obtenidos del mismo así como los cálculos realizados para determinar el consumo real obtenido en los ensayos se reflejan en los siguientes números:

Tabla 32.1.1.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 para intercambiador de columna recta

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>RESISTENCIA: 1.500 w • 0,50 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>BOMBA: 150 • 1 h =</i>	150 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	900 Wh
<i>A 0,06 €/kWh =</i>	<b>0,054 €/litro recuperado</b>

Tabla 32.1.2.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 para intercambiador de columna recta

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>RESISTENCIA: 1.500 w • 0,50 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>BOMBA: 750 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	1.500 Wh
<i>A 0,06 €/kWh =</i>	<b>0,09 €/litro recuperado</b>

Tabla 32.1.3.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 para intercambiador de columna recta

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>RESISTENCIA: 1.500 w • 0,50 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>BOMBA: 200 • 1 h =</i>	200 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	950 Wh
<i>A 0,06 €/kWh =</i>	<b>0,057 €/litro recuperado</b>

### 32.2.- Determinaciones económicas en la consideración de energía térmica gratuita

Se ha podido llegar a los resultados económicos que se muestran a continuación, considerando el precio de la energía eléctrica de 0,06 €/KWh y un coste nulo para la energía térmica empleada en el calentamiento del sistema. Esto es posible considerando que se dispone de un caudal suficiente de agua caliente residual de procedencia industrial que puede valorizarse para su aprovechamiento térmico en el proceso depurador empleado. Tanto esta como las demás condiciones de partida han sido

ampliamente descritas en los apartados relativos a la justificación y objetivos de la presente Tesis Doctoral.

Además, se sabe que para evaporar un litro de agua en las condiciones descritas anteriormente se necesitó una hora de ensayo.

Con todo esto, los datos obtenidos del mismo así como los cálculos realizados para determinar el consumo real obtenido en el ensayo se reflejan en los siguientes números:

Tabla 32.2.1.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 para intercambiador de columna recta en consideración de energía térmica gratuita

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>RESISTENCIA: 1.500 w • 0.50 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>BOMBA: 150 • 1 h =</i>	150 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	150 Wh
<i>A 0,06 €/kWh =</i>	<b>0,009 €/litro recuperado</b>

Tabla 32.2.2.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 para intercambiador de columna recta en consideración de energía térmica gratuita

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>RESISTENCIA: 1.500 w • 0.50 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>BOMBA: 750 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	750 Wh
<i>A 0,06 €/kWh =</i>	<b>0,045 €/litro recuperado</b>

Tabla 32.2.3.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 para intercambiador de columna recta en consideración de energía térmica gratuita

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>RESISTENCIA: 1.500 w • 0.50 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>BOMBA: 200 • 1 h =</i>	200 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	200 Wh
<i>A 0,06 €/kWh =</i>	<b>0,012 €/litro recuperado</b>

### **32.3.- Optimización de la economía del proceso por aprovechamiento máximo del rendimiento de la bomba de vacío**

---

Con los instrumentos empleados para la realización de los ensayos realizados en la presente Tesis Doctoral, se puede llegar a optimizar de modo teórico el precio por metro cúbico de agua recuperada mediante el procedimiento de descontaminación por Evaporación de Película Ascendente.

Para lograr la optimización de la economía del proceso, se ha realizado una estimación de la capacidad de succión de las bombas empleadas según las características de las mismas descritas en sus respectivos manuales técnicos y el potencial de soporte de otros montajes similares al ensayado dispuestos en serie. Con esto se pretende conseguir un mayor aprovechamiento del trabajo realizado por las bombas, cuyo rendimiento en los ensayos realizados ha sido espectacularmente bajo, y con ello también una reducción del precio final del agua recuperada.

El primer cálculo realizado para esta estimación es el del volumen máximo en el que las bombas son capaces de crear el vacío necesario en un periodo máximo de una hora (tiempo estimado como aceptable para el inicio del proceso en estado estacionario). Con ello, se tiene que en las condiciones de presión y temperatura habituales en el laboratorio (1 atm y 25°C):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{de aquí, } n = 0,0409 \text{ moles de aire / litro de aire.}$$

Por lo que el volumen del aire a la temperatura y presión de trabajo será:

$$V = 5,238 \text{ dm}^3 \text{ (vacío) / dm}^3$$

Siendo:

$$T = 55^\circ\text{C} = 328^\circ\text{K}$$

$$P = 0,21 \text{ atm.}$$

Por lo que la variación de volumen experimentada por los gases internos en los aparatos es de  $5,238 \text{ dm}^3$  (vacío)/  $\text{dm}^3$ .

A continuación se determina el volumen máximo succionado por las bombas en condiciones de trabajo. Para ello, considerando que cada aparato de destilación colocado en serie tiene 20 litros de volumen interior, esto implica que por cada aparato puesto en serie las bombas han de succionar  $0,104 \text{ m}^3$  de aire en condiciones de trabajo, para alcanzar el vacío de funcionamiento del MEPA #1

### Bomba TELSTAR RD-18

Para el caso de la bomba de vacío **TELSTAR RD-18** que puede succionar  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , se tiene que para alcanzar el vacío se requieren  $5,2 \cdot 10^{-3}$  horas por aparato, por lo que se deduce que el número máximo teórico de aparatos colocables en paralelo es de 192, ya que:

$$\frac{1h}{5,2 * 10^{-3} h / aparato} = 192,3 aparatos.$$

Con esto se logra una mejora importante en el precio final del metro cúbico recuperado ya que ahora, en la mejor de las opciones posibles, para la bomba TELSTAR RD-18 se tiene que:

$$\frac{0,045€ / l / aparato}{192 aparatos} = 0,000234€ / l = 0,234€ / \text{m}^3$$

Por lo que el cuadro sinóptico representativo de los cálculos realizados en el presente apartado queda del siguiente modo:

Tabla 32.3.1.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba TELSTAR RD18

CONCEPTO	ENERGÍA O COSTE FINAL
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh (gratuita)
<b>BOMBAS:                    750 • 1 h =</b>	750 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	750 Wh.
<b>Aplicable a 192 aparatos en paralelo:</b>	3,9 Wh/l = 3.900 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh        =</b>	<b>0,234 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Por el contrario, si se realizan los mismos cálculos para la optimización del coste del proceso recuperador mediante Evaporador de Película Ascendente con intercambiador de columna recta en la hipótesis de que la energía térmica empleada deba ser conseguida a partir del uso de energía eléctrica, se tiene el siguiente cuadro sinóptico:

Tabla 32.3.2.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR RD18

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>CALOR TRANSMITIDO =</i>	750 Wh
<i>BOMBAS: 750 • 1 h =</i>	750 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO:</i>	1.500 Wh.
<i>Aplicable a 192 aparatos en paralelo:</i>	7,812 Wh/l = 7.812 Wh/m <sup>3</sup>
<i>A 0,06 pts/kWh =</i>	<b>0,469 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Para el caso de utilización de las otras dos bombas en la optimización, se realizarán los mismos cálculos, que quedan de la manera siguiente:

#### **Bomba TELSTAR S-4.**

Para el caso de la bomba de vacío TELSTAR S-4 que puede succionar 4 m<sup>3</sup>/h, se tiene que para alcanzar el vacío se requieren 0,026 horas por aparato, por lo que se deduce que el número máximo teórico de aparatos colocables en paralelo es de 38, ya que:

$$\frac{1h}{0,026h / aparato} = 38,46 aparatos.$$

Con esto se logra una mejora importante en el precio final del metro cúbico recuperado ya que ahora, en la mejor de las opciones posibles, para la bomba TELSTAR S-4 se tiene que:

$$\frac{0,009€ / l / aparato}{38 aparatos} = 0,00237€ / l = 2,37€ / m^3$$

Por lo que el cuadro sinóptico representativo de los cálculos realizados en el presente apartado queda del siguiente modo:

Tabla 32.3.3.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a bajo gratuita, con bomba TELSTAR S-4

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh (gratuita)
<b>BOMBAS: 150 • 1 h =</b>	150 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	150 Wh
<b>Aplicable a 38 aparatos en paralelo:</b>	3,947 Wh/l = 3.947 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>0,237 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Por el contrario, si se realizan los mismos cálculos para la optimización del coste del proceso recuperador mediante el MEPA #1 en la hipótesis de que la energía térmica empleada deba ser conseguida a partir del uso de energía eléctrica, se tiene el siguiente cuadro sinóptico:

Tabla 32.3.4.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR S-4

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh
<b>BOMBAS: 150 • 1 h =</b>	150 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	900 Wh.
<b>Aplicable a 38 aparatos en paralelo:</b>	23,684 Wh/l = 23.684 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>1,421 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

### Bomba KNF Neuberger N 035.3.

Para el caso de la bomba de vacío KNF Neuberger N 035.3 que puede succionar 1,8 m<sup>3</sup>/h, se tiene que para alcanzar el vacío se requieren 0,057 horas por aparato, por lo que se deduce que el número máximo teórico de aparatos colocables en paralelo es de 17, ya que:

$$\frac{1h}{0,057h / aparato} = 17,54 aparatos.$$

Con esto se logra una mejora importante en el precio final del metro cúbico recuperado ya que ahora, en la mejor de las opciones posibles, para la bomba KNF Neuberger N 035.3 se tiene que:

$$\frac{0,012\text{€} / l / \text{aparato}}{17 \text{aparatos}} = 0,000706\text{€} / l = 0,706\text{€} / m^3$$

Por lo que el cuadro sinóptico representativo de los cálculos realizados en el presente apartado queda del siguiente modo:

Tabla 32.3.5.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba KNF Neuberger N 035.3

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh (gratuita)
<b>BOMBAS: 200 • 1 h =</b>	200 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	200 Wh
<b>Aplicable a 17 aparatos en paralelo:</b>	11,765 Wh/l = 11.765 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>0,706 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Por el contrario, si se realizan los mismos cálculos para la optimización del coste del proceso recuperador mediante el MEPA #1 en la hipótesis de que la energía térmica empleada deba ser conseguida a partir del uso de energía eléctrica, se tiene el siguiente cuadro sinóptico:

Tabla 32.3.6.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba KNF Neuberger N 035.3

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh
<b>BOMBAS: 200 • 1 h =</b>	200 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	950 Wh
<b>Aplicable a 17 aparatos en paralelo:</b>	55,882Wh/l = 55.882 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>3,353 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

### 33.- Economía del MEPA #2

Una vez descritos, en el apartado anterior, las determinaciones económicas la primera configuración MEPA ensayada, se presentan en éste los resultados de cálculos similares para la segunda configuración, con intercambiador de doble columna en espiral. Estos cálculos económicos, igual que en el caso anterior, se han realizado considerando las determinaciones energéticas y ensayos realizados con este segundo montaje.

A continuación se presentan algunos de los datos más relevantes que se han considerado para la realización de las determinaciones económicas correspondientes al intercambiador de doble columna en espiral:

Tabla 33.1.- datos de partida de las consideraciones económicas MEPA #2

<b>Consideraciones económicas MEPA #2</b>	
<b>Caudal destilado</b>	0,75 l/h
<b>Bombas</b>	
<b>TELSTAR RD-18</b>	750 W y 20 m <sup>3</sup> /h
<b>TELSTAR S-4</b>	150 W y 1,8 m <sup>3</sup> /h
<b>KNF N035.3</b>	200 W y 4 m <sup>3</sup> /h
<b>Sistema calefactor</b>	1500 W y 3 l/min
<b>Precio del KWh</b>	0,06 €/Kwh

#### 33.1.- Determinaciones económicas preliminares

Con todo esto, los datos obtenidos del mismo así como los cálculos realizados para determinar la economía real obtenida en los ensayos se refleja en los siguientes números:

Tabla 33.1.1.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 con intercambiador de doble columna en espiral

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>RESISTENCIA: 1.500 w • 0.50 • 1 h =</b>	750 Wh
<b>BOMBA: 150 • 1 h =</b>	150 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	1200 Wh
<b>A 0,06 €/kWh =</b>	<b>0,072 €/litro recuperado</b>

Tabla 33.1.2.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR rd18 con intercambiador de doble columna en espiral

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>RESISTENCIA:</b> $1.500\text{ w} \bullet 0.50 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>BOMBA:</b> $750 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	2.000 Wh
<b>A 0,06 €/kWh =</b>	<b>0,12 €/litro recuperado</b>

Tabla 33.1.3.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 con intercambiador de doble columna en espiral

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>RESISTENCIA:</b> $1.500\text{ w} \bullet 0.50 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>BOMBA:</b> $200 \bullet 1\text{ h} =$	200 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	1.266,666 Wh
<b>A 0,06 €/kWh =</b>	<b>0,076 €/litro recuperado</b>

### 33.2.- Determinaciones económicas en la consideración de energía térmica gratuita

Se ha podido llegar a los resultados económicos que se muestran a continuación, considerando el precio de la energía eléctrica de 0,06 €/KWh y un coste nulo para la energía térmica empleada en el calentamiento del sistema.

Por otra parte, se sabe que para evaporar un 0,75 litros de agua en las condiciones descritas anteriormente se necesitó una hora de ensayo.

Con todo esto, los datos obtenidos del mismo así como los cálculos realizados para determinar el consumo real obtenido en el ensayo se reflejan en los siguientes números:

Tabla 33.2.1.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR S-4 con intercambiador de doble columna en espiral en consideración de energía térmica gratuita

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>RESISTENCIA:</b> $1.500\text{ w} \bullet 0.50 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>BOMBA:</b> $150 \bullet 1\text{ h} =$	150 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	200 Wh
<b>A 0,06 €/kWh =</b>	<b>0,012 €/litro recuperado</b>

Tabla 33.2.2.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba TELSTAR RD18 con intercambiador de doble columna en espiral en consideración de energía térmica gratuita

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>RESISTENCIA:</b> $1.500\text{ w} \bullet 0.50 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>BOMBA:</b> $750 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	1.000 Wh
<b>A 0,06 €/kWh =</b>	<b>0,06 €/litro recuperado</b>

Tabla 33.2.3.- COSTE REAL para recuperar un litro con bomba KNF Neuberger N 035.3 con intercambiador de doble columna en espiral en consideración de energía térmica gratuita:

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>RESISTENCIA:</b> $1.500\text{ w} \bullet 0.50 \bullet 1\text{ h} =$	750 Wh
<b>BOMBA:</b> $200 \bullet 1\text{ h} =$	200 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	266,666 Wh
<b>A 0,06 €/kWh =</b>	<b>0,016 €/litro recuperado</b>

### 33.3.- Optimización de la economía del proceso por aprovechamiento máximo del rendimiento de la bomba de vacío

Con los instrumentos empleados para la realización de los ensayos realizados en la presente Tesis Doctoral, se puede llegar a optimizar de modo teórico el precio por metro cúbico de agua recuperada mediante el procedimiento de descontaminación por Evaporación de Película Ascendente.

Para lograr la optimización de la economía del proceso, se ha realizado una estimación de la capacidad de succión de las bombas empleadas según las características de las mismas descritas en sus respectivos manuales técnicos y el potencial de soporte de otros montajes similares al ensayado dispuestos en serie. Con esto se pretende conseguir un mayor aprovechamiento del trabajo realizado por las bombas, y con ello también una reducción del precio final del agua recuperada.

El primer cálculo realizado para esta estimación es el del volumen máximo en el que las bombas son capaces de crear el vacío necesario en un periodo máximo de una hora (tiempo estimado como aceptable para el inicio del proceso en estado estacionario). Con ello, se tiene que en las condiciones de presión y temperatura habituales en el laboratorio (1 atm y 25°C):

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{de aquí, } n = 0,0409 \text{ moles de aire / litro de aire.}$$

Por lo que el volumen del aire a la temperatura y presión de trabajo será:

$$V = 5,238 \text{ dm}^3 \text{ (vacío) / dm}^3$$

Siendo:

$$T = 55^\circ\text{C} = 328^\circ\text{K}$$

$$P = 0,21 \text{ atm.}$$

Por lo que la variación de volumen experimentada por los gases internos en los aparatos es de  $5,238 \text{ dm}^3 \text{ (vacío) / dm}^3$ .

A continuación se determina el volumen máximo succionado por las bombas en condiciones de trabajo. Para ello, considerando que cada aparato de destilación colocado en serie tiene 20 litros de volumen interior, esto implica que por cada aparato puesto en serie las bombas han de succionar  $0,104 \text{ m}^3$  de aire en condiciones de trabajo, para alcanzar el vacío de funcionamiento del MEPA #2.

### **Bomba TELSTAR RD-18**

Para el caso de la bomba de vacío TELSTAR RD-18 que puede succionar  $20 \text{ m}^3/\text{h}$ , se tiene que para alcanzar el vacío se requieren  $5,2 \cdot 10^{-3}$  horas por aparato, por lo que se deduce que el número máximo teórico de aparatos colocables en paralelo es de 192, ya que:

$$\frac{1 \text{ h}}{5,2 \cdot 10^{-3} \text{ h / aparato}} = 192,3 \text{ aparatos.}$$

Con esto se logra una mejora importante en el precio final del metro cúbico recuperado ya que ahora, en la mejor de las opciones posibles, para la bomba TELSTAR RD-18 se tiene que:

$$\frac{0,06\text{€}/l/\text{aparato}}{192\text{aparatos}} = 0,000312\text{pts}/l = 0,312\text{€}/m^3$$

Por lo que el cuadro sinóptico representativo de los cálculos realizados en el presente apartado queda del siguiente modo:

Tabla 33.3.1.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba TELSTAR RD18

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh (gratuita)
<b>BOMBAS: 750 • 1 h =</b>	750 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	1000 Wh
<b>Aplicable a 192 aparatos en paralelo:</b>	5,208 Wh/l = 5.208 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>0,312 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Por el contrario, si se realizan los mismos cálculos para la optimización del coste del proceso recuperador mediante Evaporador de Película Ascendente con intercambiador de columna recta en la hipótesis de que la energía térmica empleada deba ser conseguida a partir del uso de energía eléctrica, se tiene el siguiente cuadro sinóptico:

Tabla 33.3.2.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR RD18

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh
<b>BOMBAS: 750 • 1 h =</b>	750 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	2.000 Wh
<b>Aplicable a 192 aparatos en paralelo:</b>	10,417 Wh/l = 10.417 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>0,625 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Para el caso de utilización de las otras dos bombas en la optimización, se realizarán los mismos cálculos, que quedan de la manera siguiente:

#### **Bomba TELSTAR S-4.**

Para el caso de la bomba de vacío TELSTAR S-4 que puede succionar 4 m<sup>3</sup>/h, se tiene que para alcanzar el vacío se requieren 0,026 horas por aparato, por lo que se deduce que el número máximo teórico de aparatos colocables en paralelo es de 38, ya que:

$$\frac{1h}{0,026h / aparato} = 38,46 aparatos.$$

Con esto se logra una mejora importante en el precio final del metro cúbico recuperado ya que ahora, en la mejor de las opciones posibles, para la bomba TELSTAR S-4 se tiene que:

$$\frac{0,012€ / l / aparato}{38 aparatos} = 0,000316€ / l = 0,316€ / m^3$$

Por lo que el cuadro sinóptico representativo de los cálculos realizados en el presente apartado queda del siguiente modo:

**Tabla 33.3.3.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba TELSTAR S-4**

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh (gratuita)
<b>BOMBAS: 150 • 1 h =</b>	150 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	200 Wh
<b>Aplicable a 38 aparatos en paralelo:</b>	5,263 Wh/l = 5.263 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>0,316 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Por el contrario, si se realizan los mismos cálculos para la optimización del coste del proceso recuperador mediante el MEPA #2 en la hipótesis de que la energía térmica empleada deba ser conseguida a partir del uso de energía eléctrica, se tiene la tabla 33.3.4.

Tabla 33.3.4.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba TELSTAR S-4

<i>CONCEPTO</i>	<i>ENERGÍA O COSTE FINAL</i>
<i>CALOR TRANSMITIDO =</i>	750 Wh
<i>BOMBAS: 150 • 1 h =</i>	150 Wh
<i>TOTAL CONSUMIDO por litro:</i>	1200 Wh
<i>Aplicable a 38 aparatos en paralelo:</i>	31,579 Wh/l = 31.579 Wh/m <sup>3</sup>
<i>A 0,06 pts/kWh =</i>	<b>1,895 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

**Bomba KNF Neuberger N 035.3.**

Para el caso de la bomba de vacío KNF Neuberger N 035.3 que puede succionar 1,8 m<sup>3</sup>/h, se tiene que para alcanzar el vacío se requieren 0,057 horas por aparato, por lo que se deduce que el número máximo teórico de aparatos colocables en paralelo es de 17, ya que:

$$\frac{1h}{0,057h / \text{aparato}} = 17,54 \text{ aparatos.}$$

Con esto se logra una mejora importante en el precio final del metro cúbico recuperado ya que ahora, en la mejor de las opciones posibles, para la bomba KNF Neuberger N 035.3 se tiene que:

$$\frac{0,016€ / l / \text{aparato}}{17 \text{ aparatos}} = 0,000941€ / l = 0,941€ / m^3$$

Por lo que el cuadro sinóptico representativo de los cálculos realizados en el presente apartado queda del siguiente modo:

## IX.- ESTUDIO ECONÓMICO

Tabla 33.3.5.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica gratuita, con bomba KNF Neuberger N 035.3

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh (gratuita)
<b>BOMBAS: 200 • 1 h =</b>	200 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO por litro:</b>	266,666 Wh
<b>Aplicable a 17 aparatos en paralelo:</b>	15,686 Wh/l = 15.686 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>0,941 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

Por el contrario, si se realizan los mismos cálculos para la optimización del coste del proceso recuperador mediante Evaporador de Película Ascendente con intercambiador de columna recta en la hipótesis de que la energía térmica empleada deba ser conseguida a partir del uso de energía eléctrica, se tiene el siguiente cuadro sinóptico:

Tabla 33.3.6.- OPTIMIZACIÓN DEL PRECIO del metro cúbico recuperado, suponiendo energía calorífica a abonar, con bomba KNF Neuberger N 035.3

<b>CONCEPTO</b>	<b>ENERGÍA O COSTE FINAL</b>
<b>CALOR TRANSMITIDO =</b>	750 Wh
<b>BOMBAS: 200 • 1 h =</b>	200 Wh
<b>TOTAL CONSUMIDO:</b>	1.266,66 Wh
<b>Aplicable a 17 aparatos en paralelo:</b>	74,510Wh/l = 74.510 Wh/m <sup>3</sup>
<b>A 0,06 pts/kWh =</b>	<b>4,471 €/m<sup>3</sup> evaporado</b>

### 34.- Comparación de la economía de los procedimientos utilizados

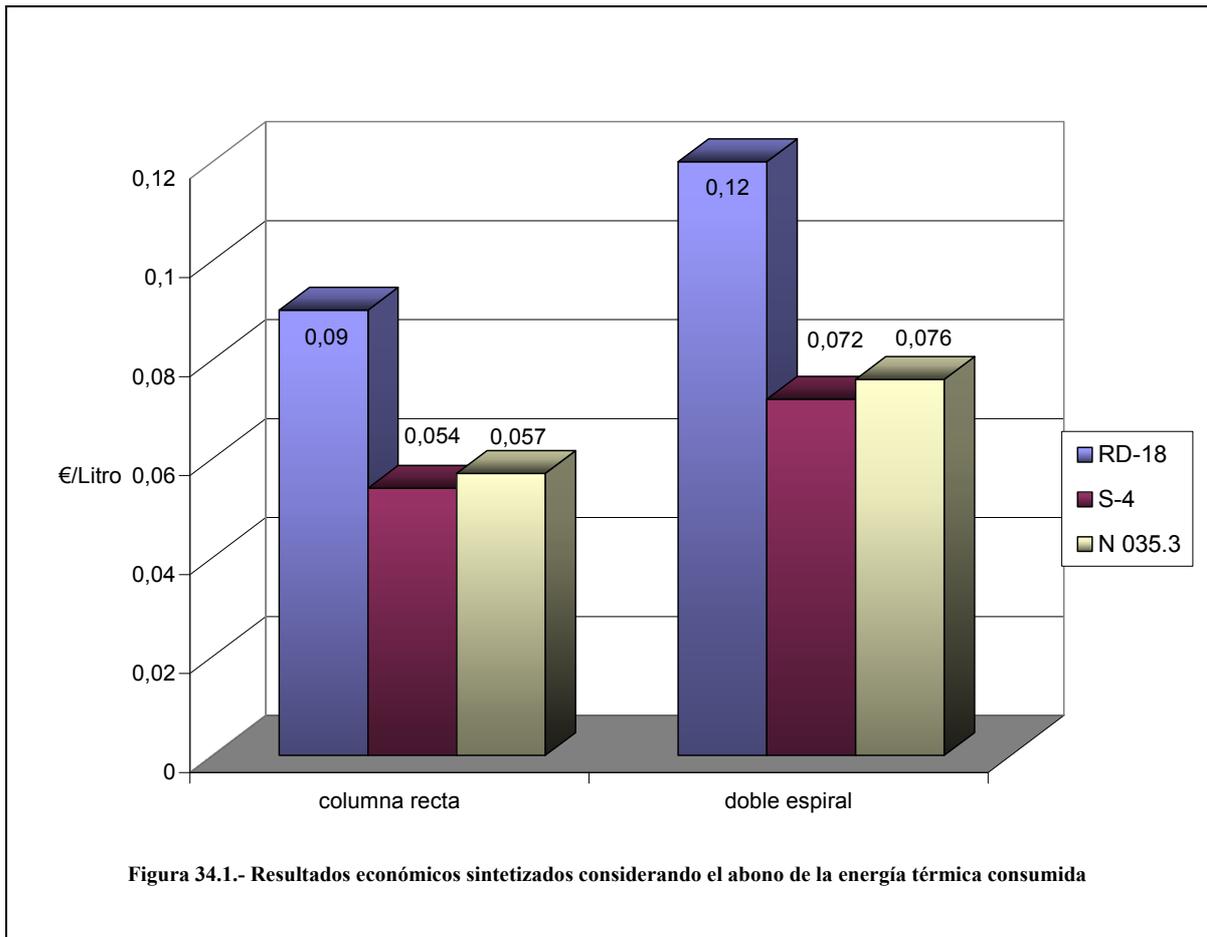
Tras la realización de las determinaciones económicas descritas en los apartados 32 y 33 del presente documento y las respectivas optimizaciones de la economía de los procesos para cada una de las configuraciones MEPA ensayadas así como para cada una de las bombas que se han utilizado en estas determinaciones, se estima oportuno presentar en forma sintética y tabulada los resultados más destacables obtenidos en los apartados anteriormente citados.

Los datos que se presentan se han organizado en cuatro tablas. La primera tabla muestra una comparativa de los costes reales de la descontaminación del agua en el caso de tener que abonar el coste de la energía térmica utilizada en el proceso.

Tabla 34.1.- Resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida

<b><i>ECONOMÍA CONSIDERANDO LA ENERGÍA TÉRMICA A ABONAR</i></b>		
<b><i>BOMBAS/FORMATOS</i></b>	<b>COLUMNA RECTA</b>	<b>DOBLE ESPIRAL</b>
<b><i>TELSTAR RD-18</i></b>	0,09 €/l	0,12 €/l
<b><i>TELSTAR S-4</i></b>	0,054 €/l	0,072 €/l
<b><i>KNF N035.3</i></b>	0,057 €/l	0,076 €/l

Lo que visto en forma de gráfico queda del modo que se muestra en la figura 34.1:

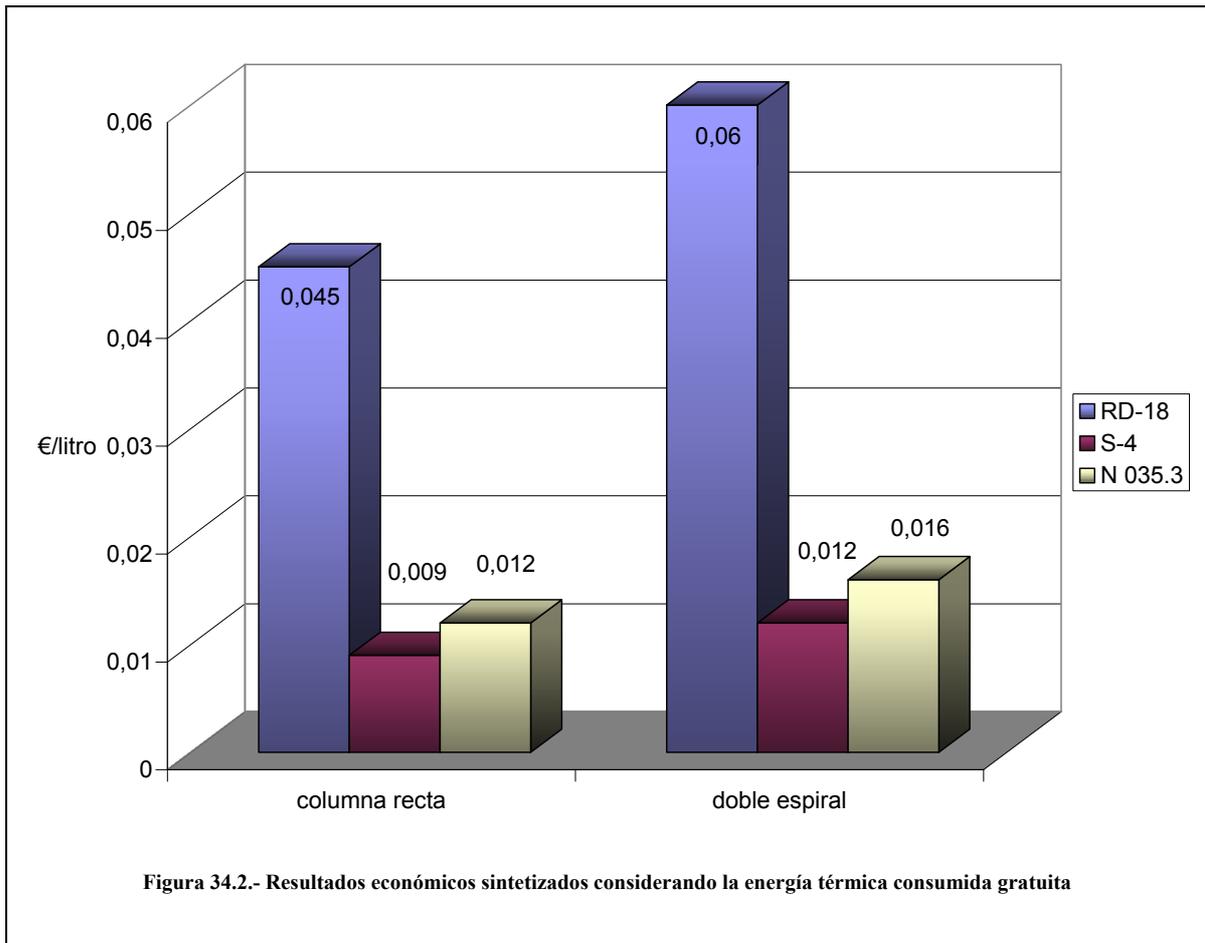


La tabla 34.2 muestra comparativamente los costes reales de la descontaminación del agua en el supuesto de disponer de la energía térmica necesaria gratuita.

**Tabla 34.2.- Resultados económicos sintetizados considerando la energía térmica consumida gratuita**  
***ECONOMÍA CONSIDERANDO LA ENERGÍA TÉRMICA GRATUITA***

<b><i>BOMBAS/FORMATOS</i></b>	<b>COLUMNA RECTA</b>	<b>DOBLE ESPIRAL</b>
<b><i>TELSTAR RD-18</i></b>	0,045 €/l	0,06 €/l
<b><i>TELSTAR S-4</i></b>	0,009 €/l	0,012 €/l
<b><i>KNF N035.3</i></b>	0,012 €/l	0,016 €/l

Que, visto en forma de gráfico queda del modo en que se muestra en la figura 34.2:



La tabla 34.3 muestra la misma comparativa que en el caso mostrado en la tabla primera pero habiéndose realizado ya la optimización de los costes en función del rendimiento y capacidad de succión de cada una de las bombas utilizadas en cada una de las dos configuraciones MEPA ensayadas.

Tabla 34.3.- Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida

<b>OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA CONSIDERANDO LA ENERGÍA TÉRMICA A ABONAR</b>		
<b>BOMBAS/FORMATOS</b>	<b>COLUMNA RECTA</b>	<b>DOBLE ESPIRAL</b>
<b>TELSTAR RD-18</b>	0,469 €/m <sup>3</sup>	0,625 €/m <sup>3</sup>
<b>TELSTAR S-4</b>	1,421 €/m <sup>3</sup>	1,895 €/m <sup>3</sup>
<b>KNF N035.3</b>	3,353 €/m <sup>3</sup>	4,471 €/m <sup>3</sup>

Que puede representarse en forma gráfica de la manera que se muestra en la figura 34.3:

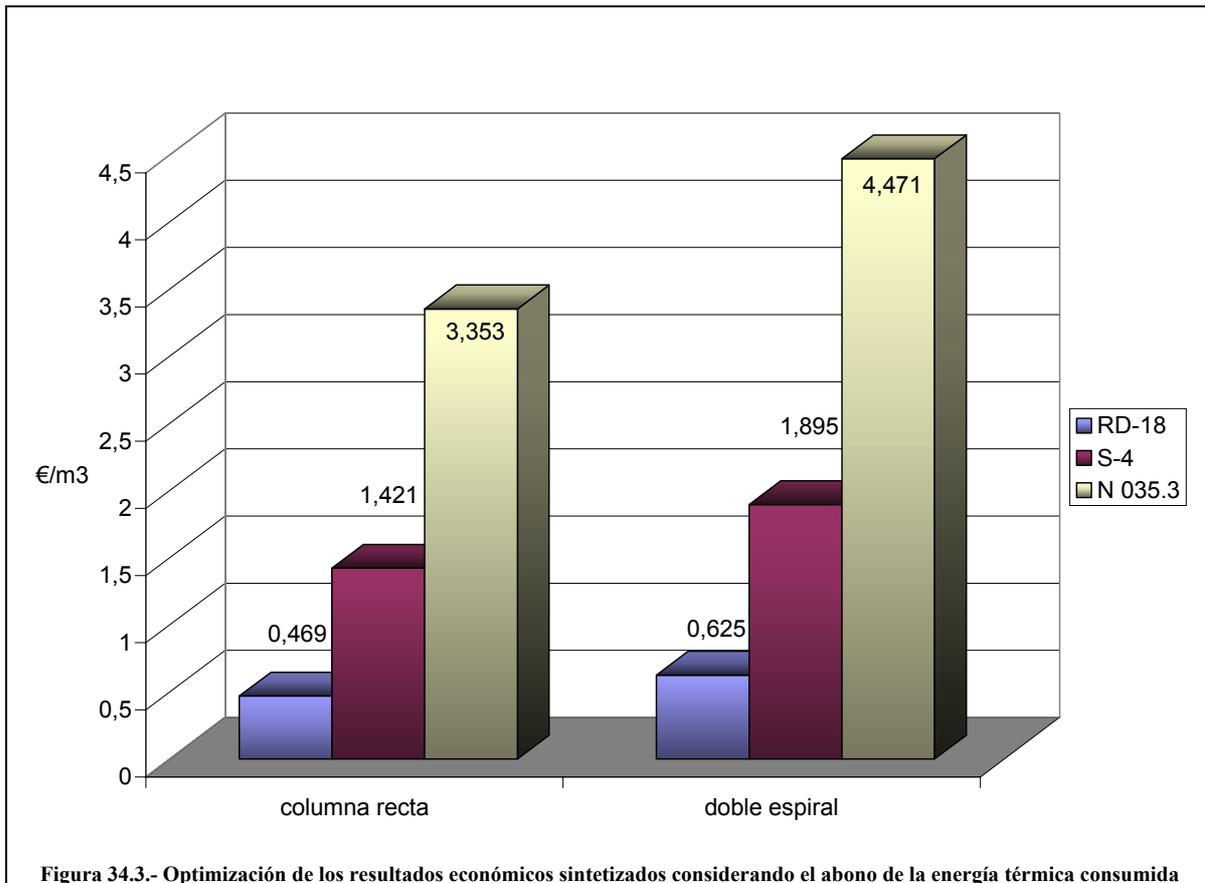


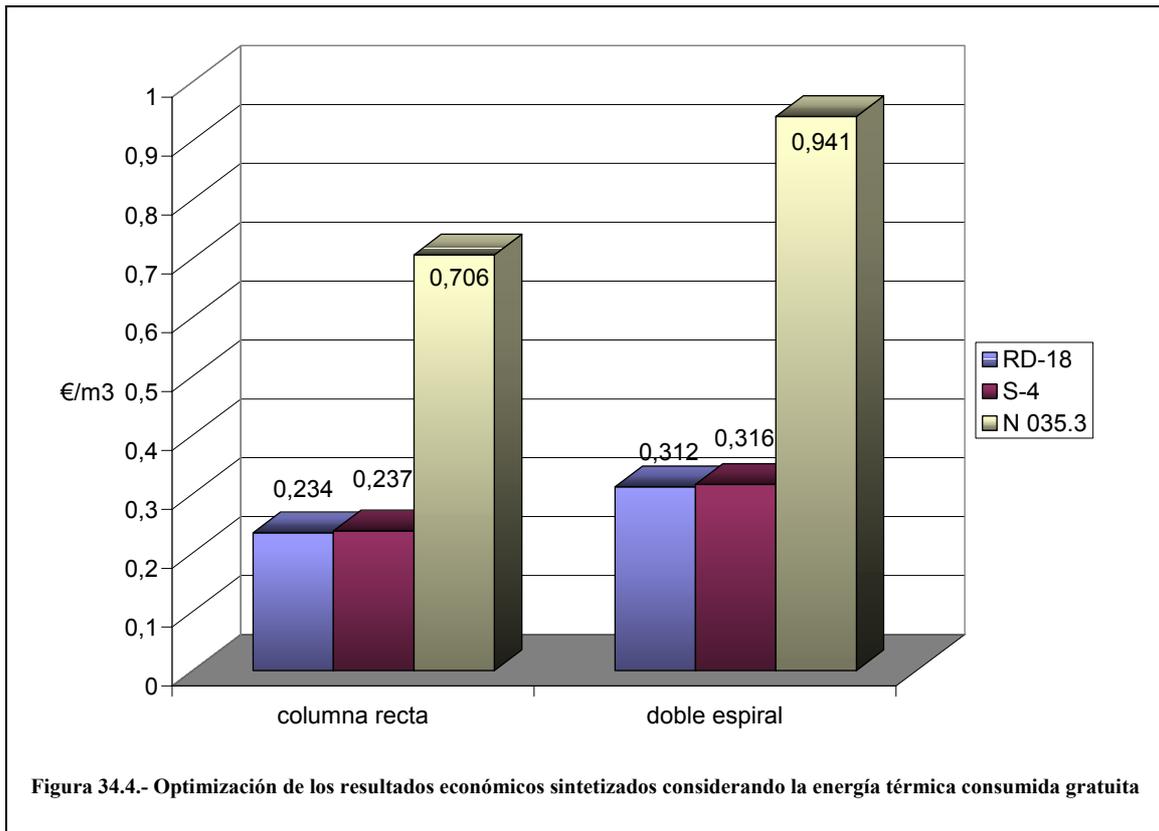
Figura 34.3.- Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando el abono de la energía térmica consumida

En la tabla 34.4 se muestra la misma comparativa que en la tabla 34.2 con la excepción de presentar los resultados correspondientes a la optimización de los costes considerando el rendimiento y capacidad de cada bomba utilizada en las dos opciones de configuración MEPA ensayadas.

Tabla 34.4.- Optimización de los resultados económicos sintetizados considerando la energía térmica consumida gratuita

<b>OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA CONSIDERANDO LA ENERGÍA TÉRMICA GRATUITA</b>		
<b>BOMBAS/FORMATOS</b>	<b>COLUMNA RECTA</b>	<b>DOBLE ESPIRAL</b>
<b>TELSTAR RD-18</b>	0,234 €/m <sup>3</sup>	0,312 €/m <sup>3</sup>
<b>TELSTAR S-4</b>	0,237 €/m <sup>3</sup>	0,316 €/m <sup>3</sup>
<b>KNF N035.3</b>	0,706 €/m <sup>3</sup>	0,941 €/m <sup>3</sup>

Por último, termina el capítulo económico con una representación gráfica en la que, de igual modo que se ha realizado para las tablas anteriores, se muestran visualmente los valores numéricos correspondientes a la tabla 34.4.





## CONCLUSIONES

---

X

35. Conclusiones particulares de los ensayos y resultados experimentales	215
36. Conclusiones particulares del estudio energético	219
37. Conclusiones particulares del estudio económico	221
38. Conclusión general	223



## 35.- Conclusiones particulares de los ensayos y resultados experimentales

---

Se presentan a continuación las conclusiones particulares extraídas de los ensayos de laboratorio realizados para la elaboración del Estudio de la Recuperación de Aguas Contaminadas con Iones Metálicos organizadas según cuatro categorías principales para su mejor esquematización:

- Conclusiones particulares de los resultados de los ensayos con MEPA #1
- Conclusiones particulares de los resultados de los ensayos con MEPA #2
- Conclusiones generales de los resultados obtenidos

Dentro de cada una de estas categorías se encuentran resumidas las principales ideas, datos objetivos y consideraciones finales respecto de cada uno de los temas indicados en su respectivo título. Así:

### 35.1.- Conclusiones particulares de los resultados de los ensayos con MEPA #1

---

Revisados los resultados obtenidos en los diversos ensayos realizados con el MEPA #1 (intercambiador de columna recta vertical) se pueden extraer las siguientes conclusiones particulares:

- El proceso de evaporación es poco estable, alternándose momentos de elevada ebullición con otros en los que el proceso quedaba atenuado.
- El precalentamiento del líquido alimento ha supuesto una mejora del 15% en los resultados obtenidos en términos de caudal destilado, en la estabilidad del proceso y la duración de los ensayos realizados.

- Mejoras en las condiciones de aislamiento térmico de los intercambiadores suponen una disminución del tiempo de duración de los ensayos y un aumento del caudal destilado obtenido.
- En las mejores condiciones de funcionamiento ensayadas de esta configuración del MEPA #1, el caudal medio destilado obtenido ha sido de 1 l/h, para un caudal de calefacción de 3 l/min a 65°C y un vacío aplicado al sistema de 620 – 640 mm Hg.

### **35.2.- Conclusiones particulares de los resultados de los ensayos con MEPA #2**

---

Para el caso del MEPA #2 (intercambiador de doble columna en espiral), de los resultados obtenidos en los diversos ensayos con él realizados se pueden extraer las siguientes conclusiones particulares:

- El MEPA #2 ha demostrado ser más estable en el proceso de evaporación, desapareciendo los altos y bajos de funcionamiento del caso anterior.
- El MEPA #2 mantiene la superficie de contacto en un volumen ocupado inferior al de la configuración anterior MEPA #1, lo que supone una mejora en cuanto a compacidad que debe ser tenida en cuenta.
- Ensayado el MEPA con el intercambiador de doble columna en espiral, en las mejores condiciones de funcionamiento ensayadas, el caudal medio destilado obtenido ha sido de 750 ml/h, para un caudal de calefacción de 3 l/min a 65°C y un vacío aplicado al sistema de 620 – 640 mm Hg.
- Esta configuración de evaporador es un 25 % menos eficiente que la anterior en términos de caudal absoluto.

### **35.3.- Conclusiones generales de los resultados obtenidos**

---

Estudiados los resultados obtenidos de los ensayos que se detallan en el capítulo VII, así como consideradas también las conclusiones que sobre cada montaje en particular se citan en los subapartados anteriores, se puede llegar a una serie de conclusiones de índole general respecto del citado estudio:

- Se ha puesto de manifiesto la validez de esta tecnología en el campo de la recuperación de aguas contaminadas con iones de metales pesados y especialmente en la dirección definida al hablar del objeto de la investigación. Su validez se hace extensible a la concentración de productos disueltos siempre que éstos, por sus características, no sean volátiles en las condiciones de funcionamiento, puedan cristalizar o formar espumas que dificulten el funcionamiento correcto del Aparato.
- Se ha trabajado en las condiciones más desfavorables (vacío suministrado al sistema, temperatura de calefacción...) que permiten el funcionamiento correcto del MEPA con el condicionante de disponer de un caudal de calefacción suficiente de procedencia industrial y potencial valorización, por lo que condiciones de funcionamiento por debajo de las definidas provocan la desaparición de la ebullición y con ello el incorrecto funcionamiento del aparato. Condiciones de trabajo más favorables supondrán mejoras en los aspectos energético y económico que deberán tenerse en cuenta en posteriores estudios.
- Las diferentes configuraciones MEPA utilizadas en los ensayos, trabajando tanto en discontinuo como en continuo, con y sin precalentamiento previo del alimento, hacen destacar a este sistema por su flexibilidad operacional y posibilidades de aprovechamiento.
- De los ensayos de recuerdo realizados se deduce que existe un leve efecto de recuerdo en los resultados de conductividad, que desaparece durante los primeros minutos del siguiente ensayo. Este efecto no es importante, no afecta

significativamente a los resultados y puede hacerse desaparecer mediante un lavado previo del aparato.

- El caudal de recirculación del líquido calefactor tiene una influencia muy grande en la eficiencia de la transmisión del calor puesto que caudales pequeños implican regímenes laminares y esto dificulta la transmisión del calor efectiva entre el líquido calefactor y el líquido alimento. Un aumento suficiente del caudal de calefacción hasta tener regímenes turbulentos permitirá un aumento de la transmisión de calor que deberá tenerse en cuenta en posteriores estudios.
- En las condiciones y supuestos del trabajo realizado, el precalentamiento del alimento ha reducido de manera efectiva el tiempo de duración de los ensayos en un 15%.
- Mejoras en las condiciones de aislamiento térmico de los intercambiadores suponen una disminución del tiempo de duración de los ensayos, una mayor estabilidad del proceso de evaporación así como un mayor caudal destilado obtenido.
- No se observa una mejora significativa en la calidad del destilado obtenido cuando se recircula el caudal de calefacción.
- De todas las configuraciones ensayadas, es la MEPA #1 con recirculación del líquido calefactor la que mejores resultados, en términos de caudal destilado, genera. Siendo esta configuración la que se considera más adecuada para los objetivos que se persiguen.

### 36.- Conclusiones particulares del estudio energético

---

Del estudio detenido de los resultados energéticos descritos en el Capítulo VIII y en particular de la síntesis de estos resultados que se presenta en el apartado nº30, pueden extraerse las siguientes conclusiones particulares relativas a la energética del proceso de recuperación de aguas por procedimientos térmicos:

- Las determinaciones energéticas experimentales no coinciden con las determinaciones teóricas, especialmente aquellas obtenidas por correlaciones (Kern, Muñoz y Corrochano, Chen y Edelstein...). Esto es debido a que las condiciones en las que se ha trabajado en el laboratorio suponen el uso de un pequeño caudal de calefacción, lo que a su vez supone un bajo número de Reynolds y esto implica trabajar, en los casos tratados, en regímenes hidráulicos laminares y quasilaminares para el flujo de calefacción. Por el contrario, las correlaciones parten del supuesto inicial de trabajar en las condiciones más favorables, esto es: en regímenes turbulentos.
- De la comparativa de los caudales reales y teóricos de destilado obtenidos por los diversos procedimientos ensayados se tiene que existen unas pérdidas caloríficas en los intercambiadores que oscilan entre el 35% para el intercambiador de columna recta y el 50% para el de doble columna en espiral.
- Los valores experimentales del coeficiente global de transmisión de calor ( $U_o$ ) obtenidos son distintos en función del MEPA utilizado. Así,  $U_o = 407,5 \text{ W/m}^2\text{°C}$  para MEPA #1 y  $U_o = 311,16 \text{ W/m}^2\text{°C}$  para MEPA #2. Esto supone una eficiencia en la transmisión de calor de en torno a un 30% favorable al MEPA #1 y justifica las diferencias de caudal destilado observadas en los ensayos realizados con las diferentes configuraciones MEPA ensayadas.
- De las dos configuraciones generales comparadas (MEPA #1 y MEPA #2) la correspondiente a un intercambiador de tubo recto vertical, MEPA #1, es la mejor en términos de eficiencia energética.



### 37.- Conclusiones particulares del estudio económico

---

De los apartados relativos al Capítulo IX, en los que se destaca la importancia que el ahorro de agua tiene en la sociedad actual y particularmente en la economía de los procesos industriales, se considera relevante extraer las siguientes conclusiones:

- El rendimiento de las distintas configuraciones MEPA ensayadas en laboratorio ha sido, en algunos casos, notablemente bajo. Por el contrario, otras configuraciones han demostrado tener rendimientos económicos aceptables.
- La utilización en el laboratorio de los MEPA diseñados dificulta el aprovechamiento de la totalidad de sistemas que los componen a su plena eficiencia. Por ello, tras el cálculo de la economía a escala de laboratorio, se han realizado estimaciones del coste del agua recuperada en el caso de poder disponer de estos aparatos funcionando a plena capacidad.
- El coste del litro destilado en las condiciones de trabajo empleadas ha sido de entre 0,09 y 0,076 €/l según configuraciones MEPA para el caso de abonar la totalidad de la energía consumida en el proceso.
- El coste del litro destilado en las condiciones de trabajo empleadas ha sido de entre 0,06 y 0,045 €/l según configuraciones MEPA para el caso de disponer de energía térmica gratuita procedente de un caudal de agua caliente residual de tipo industrial.
- En la consideración de la optimización de los costes de la recuperación de aguas, se tiene un coste del metro cúbico destilado de entre 0,469 y 4,471 €/m<sup>3</sup> para el caso de abonar la totalidad de la energía consumida en el proceso.
- En la consideración de la optimización de los costes de la recuperación de aguas, se tiene un coste del metro cúbico destilado de entre 0,234 y 0,941 €/m<sup>3</sup> para el

caso de disponer de energía térmica gratuita procedente de un caudal de agua caliente residual de tipo industrial.

- Del estudio económico realizado se concluye que, en la mejor de las condiciones en las que se ha trabajado en dicho estudio, el coste más favorable del agua recuperada es de 0,234 €/m<sup>3</sup> y corresponde al MEPA #1 con vacío realizado por la máquina TELSTAR RD18 en condiciones de rendimiento máximo de la misma.

### 38.- Conclusión General

---

De la realización de la presente Tesis Doctoral que lleva por título “Evaluación del rendimiento de recuperación de vertidos contaminados por iones de metales pesados mediante técnicas evaporativas. Análisis energético y económico.” en las condiciones de trabajo que se detallan al hablar del objeto de la misma, puede extraerse la siguiente conclusión general en el marco de los objetivos que se han perseguido en la investigación realizada al efecto:

*“La recuperación de aguas contaminadas con iones de metales pesados por procedimientos térmicos ha demostrado ser técnicamente viable en el uso de un Modelo Evaporador de Película Ascendente (MEPA) en las diversas configuraciones ensayadas. Al mismo tiempo, el interés medioambiental del proceso es muy elevado por la potencialidad de usos que se derivan de los resultados obtenidos. La economía del proceso hace, de los procedimientos térmicos estudiados, métodos altamente competitivos en las condiciones de funcionamiento ensayadas y en el supuesto de contar con un caudal residual de agua caliente que permita el ahorro energético en la calefacción, teniéndose consumos de 3,9 kWh/m<sup>3</sup> y un coste final de 0,23 €/m<sup>3</sup> en las condiciones menos desfavorables.”*

Comentario final:

La investigación desarrollada no supone un fin de trayecto para la línea de investigación en que ha sido realizada sino un paso más que abre nuevas puertas a la aplicación de las tecnologías evaporativas. Además, a partir de los resultados de la presente Tesis Doctoral, se podría abrir una línea de investigación adicional a las ya existentes para el estudio de los procesos térmicos en la aplicación descrita en condiciones más favorables.



## BIBLIOGRAFÍA

---



---

## Bibliografía

---

### Índice de monografías

1. *A.S.T.M., Manual de aguas para usos industriales.* Ed. Noriega Editores.1982.
2. *Babor, J.A.; Ibarz, J. Química General Moderna.* Ed. Marín. 6ª edición.1960. Barcelona.
3. *Bejan, A. Convection heat transfer.* Ed. John Wiley&Sons. 1995. New York.
4. *Bloom,W; Hogaboom, G.B. Galvanotecnia y galvanoplastia.* Ed. CECSA. 1982. México.
5. *Benjamin, M. M.; Honeyman, B. D. Trace metals. In: Global biogeochemistry cycles.* Ed. Butcher, S. S.; Charlson, R. J.; Orians, G. H. and Wolfe, G. V. Academic Press. 1992. Londres.
6. *Bonner, W.A; Castro, A.J. Essentials of modern organic chemistry.* Ed. Reinhold chemsity textbook series.
7. *Bott, T.R. Fouling of heat exangers.* Ed. Elsevier. 1994. Amsterdam.
8. *Burmeister, L.C. Convective heat transfer.* Ed. John Wiley&Sons. 1993. New York.
9. *Burns, R.M.; Bradley, W.W. Recubrimientos Protectores de los metales.* Ed. Interciencias. 1964. Madrid.
10. *Climent, M.D. et al. La atmósfera. Conocer la química del medio ambiente.* Ed. SPUPV.1992. Valencia.
11. *CONSELLERIA DE MEDI AMBIENT. Manual de prevención de impactos ambientales en la industria de las baldosas cerámicas.* GENERALITAT VALENCIANA.
12. *Corberán, J.M.; Royo,R. Problemas Escogidos de Transmisión de Calor.*
13. *Costa Martínez, J. Política hidráulica.* Ed. CICCPC. 1975. Madrid.
14. *Costa Novella, E et al. Ingeniería Química. Vol 4. Transmisión de Calor.* Ed. Alhambra. Madrid. 1986.
15. *Dennis, J.K.; Such, T.E. Nickel and Cromium Electroplating.* Ed. Butterworth & Co. 1986. Cambridge.
16. *Dorothy A.G.; Senior, P; Ashurst, R. Tecnología del agua embotellada.* Ed: Acribia. 2001.
17. *Doyen, C; Mary, M; Petrisot, B. Low temperature Evaporation.* Bulletin Union Phisicians, 94 (821), 335-373. 2000.
18. *Eco, U. Cómo se hace una tesis.* Biblioteca de Educación. Ed. Gedisa. 2000. Barcelona.

19. *García del Busto, M.A. Ahorro energético en el sector azulejero.* Ed. IPEAE. GENERALITAT VALENCIANA. 1990.
20. *García Garrido, J. La calidad del agua.* S.P.U.P.V. 1986. Valencia.
21. *García Garrido, J. El agua en la producción.* Ed. Prensa XXI. 1986. Barcelona.
22. *García Garrido, J; Rodríguez López, A.D. Industrias Químicas y Agroalimentarias: Análisis y Ensayos.* SPUPV. 2002. Valencia.
23. *García Garrido, J. El agua y la industria.* SPUPV.1987. Valencia.
24. *García Garrido, J. El agua y la industria química.* SPUPV.1987. Valencia.
25. *García Garrido, J. La calidad del agua. Volumen I.* Ed. Prensa XXI. 1986. Barcelona.
26. *García Garrido, J. Aguas residuales.* SPUPV.1998. Valencia.
27. *García Garrido, J; Matoses Vendrell, I; et al. Técnicas de muestreo, análisis y caracterización de residuos, lixiviados y suelos.* Grupo Tecar. CFP-UPV. 2002. Valencia.
28. *González del Tánago, J. Transmisión de calor e instalaciones de intercambio térmico empleadas en la ingeniería química.* Ed. Dossat. 1953. Madrid.
29. *Hernández Muñoz, A. Saneamiento y alcantarillado. Vertidos residuales.* Colección Senior nº7. Ed. CICCIP. 1997. Madrid.
30. *Hesselgreaves, J.E. Compact heat exchangers. Selection, design and operation.* Ed. Pergamon. 2001.
31. *Ibáñez, M-T; Power, H. Advanced boundary elements for heat transfer.* Ed. Witt press. 2002. Southampton.
32. *Ibáñez Mengual, J.A; Berná Amorós, L.M; Valerdi Pérez, R. Desalación por membranas.* 1997.
33. *Ibrahim Pereira, J.C. Desalación de aguas.* Ed: Colegio I.C.C.P. Colección Senior Nº23. 1999.
34. *IHOBE. Libro blanco para la minimización de residuos y emisiones. Recubrimientos metálicos.* Departamento de Ordenación del Territorio y Medio Ambiente. Gobierno Vasco. 1997.
35. *Incropera, F.P; De Witt, D.P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer.* Ed. John Wiley and Sons. 1996. New York. Cuarta Edición en Inglés.
36. *Juste Ruiz, J. Derecho Internacional del Medio Ambiente.* Ed. McGraw-Hill. 1999.
37. *Juste Ruiz, J; Bou Franch, V. Derecho Internacional del Medio Ambiente. Selección de Textos Básicos.* Ed. Reproexpres Ediciones. 2000. Valencia.
38. *Kakac, S; Liu, H. Heat Exchangers, Selection, Rating and Thermal Design.* Ed. CRC press. 1998. Florida. En Inglés.
39. *Kays, W.M., Crawford, M.E. Convective heat and mass transfer.* Ed. McGraw-Hill. 1993. Singapore.
40. *Kern, D.Q. Procesos de Transferencia de Calor.* Ed. McGraw-Hill. Mexico. 1990.

41. *Kreith, F. The CRC handbook of Thermal Engineering.* Ed. CRC press. 1999. Florida.
42. *Lavín Maldonado, A. Trabajo de Termodinámica.*
43. *Levenspiel, O. Flujo de fluidos. Intercambio de Calor.* Ed. Reverté. Barcelona. 1993.
44. *Lora, J; Sancho, M; Soriano, E. Desalación de aguas.* S.P.U.P.V. 2002.
45. *Lowenheim, F.A. Electroplating.* Ed. McGraw-Hill. New York. 1978.
46. *Marín Galvín, R. Análisis de aguas.* Gestió i Promoció Cultural S.A. Barcelona. 1995.
47. *Max Plank. (1922). Termodinámica.* Ed. Calpe.
48. *McCabe, L; Smith, J; Harriot, M. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química.* Ed. McGraw-Hill. 1991. Madrid.
49. *Medina San Juan, J.A. Desalación de aguas salobres y de mar.* Ed. Mundi prensa. 2000.
50. *Mercado, S. ¿Cómo se hace una tesis?.* Ed. Limusa. Noriega Editores. 2000. México D.F.
51. *Mills, A.F. Transferencia de Calor.* Ed. Irwin. 1995.
52. *Ministerio de Medio Ambiente. Libro Blanco del Agua.* Ed. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica de Medio Ambiente. 2000. Madrid.
53. *Miranda, A.J. Evaporadores.* Ediciones CEAC. 2000. Barcelona.
54. *Molera Solá, P. Recubrimientos de los Metales.* Ed. Marcombo 1989. Barcelona.
55. *Monasterio, R.; Hernández, P.; Saiz, J. Compresión Mecánica de Vapor.* Ed. Mc Graw-Hill. 1993. Madrid.
56. *Moran, M.J.; Shapiro, H.N. Fundamentos de Termodinámica.* Ed. Reverté S.A. Barcelona.
57. *Muñoz, E; Corrochano, C. Una Clase de Problemas de Transmisión del Calor.* Ed. Bellisco. Madrid. 1998.
58. *Naciones Unidas. Sobre la aplicación del Programa 21. Informe de la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible.* Johannesburg. 2002.
59. *Nemerov, L.; Dasgupta, A. Tratamientos de vertidos Industriales y Peligrosos.* Ed. Diaz Santos. 1998. Madrid.
60. *Pankratov, G. Problemas de Termotecnia.* Ed. Mir. Moscú. 1987
61. *Peiró Pérez, J, García Garrido, J. Manual de laboratorio. Procesos industriales.* S.P.U.P.V. 1987.
62. *Pellicer, J; Manzanares, J.A. Problemas de Termodinámica.* Ed. Alianza editorial. Madrid. 1996.
63. *Pitts, D.R.; Sissom, L.E. Transferencia de Calor.* Ed. McGraw-Hill. Bogotá. 1981. 1ª Ed. 1977 en inglés.
64. *Porteous, A. Saline water distillation processes.* Ed. Longman. 1975.

65. *Rico Amorós, A.M. Depuración, desalación y reutilización de aguas en España : estudio regional.* 1998
66. *Rock, P.A. (1989). Termodinámica química.* Ed. Vicens Vives.
67. *Romero Rojas, J.A. Calidad del agua. 2ª Edición.* Ed: Alfaomega y Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. (biblioteca U.P.V. 4-15 / 465)
68. *Romero Rojas, J.A. Potabilización del agua. 3ª Edición.* Ed: Alfaomega y Escuela Colombiana de Ingeniería. 1999. (biblioteca U.P.V. 4-15 / 464)
69. *Romero, R; Zúnica, L. Estadística. Diseño de experimentos. Modelos de Regresión.* Ed. UPV. 1994. Valencia.
70. *Rousseau, R.W. Handbook of separation process Technology.* Georgia Institute of Technology. Ed. John Wiley and Sons. 1987.
71. *Sheppard, T.P. Acondicionamiento de Aguas para la Industria.* Ed. Limusa.
72. *Taborek, J; Hewitt, G.F.; Afgan, N. Heat Exchangers, Theory and practice.* Ed. McGraw-Hill. 1983.
73. *Valero, A.; Uche, J; Serra, L. La desalación como alternativa al PHN.* Universidad de Zaragoza. 2001.
74. *Valiente Barderas, A. Historia de la desalación.* Educación química. 1995
75. *V. Soliakov. (1979). Termodinámica química.* Ed. Paraninfo.
76. *Weast, R.C. Handbook of Chemistry and Physics.* Ed. CRC press. 1973.USA.
77. **Documentación de la asignatura Impactos Ambientales.** ETSID. UPV.

### Índice de artículos

78. Akcil, A; Ciftci, H. **Metals recovery form multimetal sulphide concentrates: combination of termal process and pressure leaching.** Int. J. Miner. Process. 71 (2003) 233-246.
79. Belaustegui, Y et al. **Extracción selectiva de Zinc de baños residuales de procesos de decapado de la industria de la Galvanotecnia.** Tecnología y Desarrollo. Vol I. 2003.
80. Breschi, D. **Seawater distillation from low-temperature streams: a case history.** Desalination. 122 (2-3), 247-254. Jul 1999.
81. Coello, M; Sales, D; Quiroga, J. **Efectos tóxicos de los metales sobre la actividad microbiana del sistema de lodos activos.** Ingeniería del Agua. Septiembre 2002.
82. Corberán, J.M.; Gozávez, J. **Two Phase heat transfer análisis of evaporators.** Experimental thermal and fluid science 26 (2002) 259-267.
83. Doyen, C et al. **Low temperature evaporation.** Bulletin Union Phisicians. 94(821), 335-373. 2000.
84. Ejje, G. President of International Desalination Association. **Desalination, a reliable source or new water.** Ponencia a la conferencia internacional "El Plan Hidrológico Nacional y la gestión sostenible del agua. Aspectos

- medioambientales, reutilización y desalación.. C.I.R.C.E. (Centro de Investigación y Consumos Energéticos) Junio de 2001.
85. Franco, J. **Calentamiento Solar para un Destilador Multietapa Pasivo Compacto**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 4 N°1 y 2. ASADES (Asociación argentina de Energías Renovables y Ambiente). 2000.
  86. George Moss, E, et al. **Comparison of Multiple Effect Distillation and Reverse Osmosis for New Providence Island**. Caribbean Water & Wastewater Association. 1996.
  87. Groenveld, D.C. et al. **A look-up table for fully developed film-boiling heat transfer**. Nuclear Engineering and Design 225 (2003) 83-97.
  88. He, Y.; Shoji, M.; Maruyama, S. **Numerical study of high flux pool boiling heat transfer**. International Journal of Heat and Mass Transfer 44 (2001) 2357-2373.
  89. Herranz Arribas, J. **Análisis económico de la utilización de cambiadores de calor en procesos de recuperación de calor de corrientes residuales**. Tecnología y Desarrollo. Vol I. 2003.
  90. Krupiczka, R.; Rotkegel, A.; Ziobrowski, Z. **Heat transfer to evaporating liquid films within a vertical tube**. Chemical Engineering and Processing 41 (2002) 23-28.
  91. Krupiczka, R et al. **An experimental study of convective heat transfer from extruded type helical finned tubes**. Chemical Engineering and Processing 42 (2003) 29-38
  92. Lebrato, J. et al. **Eliminación de metales pesados en disolución mediante adsorción en carbón activo y arcillas de intercambio. Ensayos realizados con las aguas ácidas vertidas tras la rotura de la balsa minera de Aznalcollar (Sevilla)**. Residuos. Vol. 48. Pag. 22-26.
  93. Lebrato, J. et al. **Propuestas de plan de avenidas para el control de los efectos de vertidos tóxicos accidentales al cauce del río Guadiamar**. Tecnoambiente. Vol.9. Num. 93. 1999 Pag. 17-21.
  94. Lebrato, J. et al. **Tratamiento fisico-químico de las aguas ácidas vertidas tras la rotura de la balsa minera de Aznalcóllar (Sevilla)**. Tecnología del Agua. Vol. 19. Num. 189. 1999. Pag. 25-32.
  95. Lin, CH. J.; Chang, J.E. **Effect of fly ash characteristics on the removal of Cu(II) from aqueous solution**. Chemosphere 44 (2001) 1185-1192.
  96. Lora, J et al. **Treatment of whey effluents from dairy industries by nanofiltration membranes**. Desalination. 1998, vol 119 n°1, p. 177-184.
  97. Medina Sanjuan, J.A. **La vuelta de las grandes desaladoras de vapor ¿Un retorno al pasado?**. Noticias A.E.D.Y.R. (Asociación Española de Desalación y Reutilización. Marzo 2001.
  98. Medina Sanjuan, J.A. **La desalación en España. Situación actual y previsiones**. Ponencia a la conferencia internacional “El Plan Hidrológico Nacional y la gestión sostenible del agua. Aspectos medioambientales, reutilización y desalación. . C.I.R.C.E. (Centro de Investigación y Consumos Energéticos) Junio de 2001.

99. Mulligan, C.N. et al. **An evaluation of technologies for the heavy metal remediation of dredged sediments.** Journal of Hazardous Materials 85 (2001) 145-163.
100. Murray, J.P. **Aluminium production using high temperature solar process heat.** Solar Energy Vol 66 N°2, (1999) 133-142.
101. Neeraas, B.O.; Fredheim, A.O.; Aunan, B. **Experimental data and model for heat transfer, in liquid falling film flow on shell side, for spiral wound LNG heat exchanger.** International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 3565-3572.
102. Omobuwajo, T.O. et al. **Termal agglomeration of chocolate drink powder.** Journal of Food Engineering 46 (2000) 73-81.
103. Ovejero, M.A. et al. **Resultados preliminares del comportamiento de un evaporador por flash a escala de laboratorio para generación de electricidad a baja temperatura.** Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol 4 N°1 y 2. ASADES (Asociación argentina de Energías Renovables y Ambiente). 2000.
104. Romero Pavía, P. Jefe dpto de Captaciones de FACSA. **“Agua, turismo y medio ambiente. Conversiones en recurso hidráulico de las aguas subterráneas de baja calidad”.** Ponencia a las segundas conferencias sobre el medio ambiente. turismo y medio ambiente. CES-CV (Comité Económico y Social-Comunidad Valenciana). Julio 1999.
105. Ruiz, J.L. **La galvanización en España. Ingeniería Química.** Octubre 1991.
106. Sanz, M.A. (Director técnico de ONDEO-DEGREMONT). **La desalación de agua de mar: la experiencia de la Bahía de Palma.** Ponencia a la conferencia internacional “El Plan Hidrológico Nacional y la gestión sostenible del agua. Aspectos medioambientales, reutilización y desalación. C.I.R.C.E. (Centro de Investigación y Consumos Energéticos) Junio de 2001.
107. Schaffie, M; Ranjbar, M. **Geochemical alteration of crude oils during thermal recovery processes.** Journal of Petroleum Science and Engineering. 26 (2000) 57-65.
108. Semiat, R. **Desalination: Present and Future.** Water International, Vol25, Número 1, Marzo 2000.
109. Shao, L.X. et al. **Steps towards industrialization fo Cu-III –VI thin film solar cells: a novel full in line concept.** Journal of Physics and Chemistiry of Solids 64 (2003) 1505-1509.
110. Shiotsu, M; Hama, K. **Film boiling heat transfer from a vertical cylinder in forced flow of liquids under saturates and subcooled conditions at pressures.** Nuclear Engineering and Design 200 (2000) 23-28.
111. Soylemez, M.S. **On the thermoeconomical optimization of heat pipe heat exchanger HPHE for waste heat recovery.** Energy conversion an management 44 (2003) 2509-2515.
112. Soylemez, M.S. **On the optimum heat exchanger sizing for heat recovery.** Energy conversion and management 41 (2000) 1419-1427.

113. Spiegles, K.S.; El-Sayed, Y.M. **The energetics of desalination processes.** Desalination.134 (2001) 109-128.
114. Stephan, P.; Kern, J. **Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling.** International journal of heat and fluid flow 25 (2004) 140-148.
115. Su, F.; Prasad, R.C. **A Transient experimental method to determine the overall heat transfer coefficient in a concentric tube heat exchanger.** Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol 30 N° 5 pp 603-614, 2003.
116. Sun, G.; Hewitt, G.F. **Evaporation and condensation of steam-water in a vertical tube.** Nuclear Engineering and Design 207 (2001) 137-145.
117. Theofanus, T.G. et al. **The boiling crisis phenomenon. Part I: nucleation and nucleate boiling heat transfer.** Experimental Thermal and Fluid Science 26 (2002) 775-792.
118. Tsu-hsiang; Nobuhide Kasagi; Yuji Suzuki. **Forced convective boiling heat transfer in microtubes at low mass and heat fluxes.** Internatrional Journal of Multiphase Flow 29 (2003) 1771-1792.
119. Tocchi, E. **Tratamiento de las aguas residuales de la producción farmacéutica mediante evaporación al vacío.** Tecnología del Agua. Diciembre 2003.
120. Uche, J; Artal, J; Serra, L. **Comparison of heat transfer coefficient correlations for termal desalination units.** Desalination 2002, vol.152, p. 195-200
121. Uche, J; Serra, L.; Valero, A. **La desalación como alternativa al PHN.** C.I.R.C.E. (Centro de Investigación y Consumos Energéticos) Universidad de Zaragoza. Enero de 2001.
122. Uche, J.; Valero, A. **¿Hasta qué punto es alternativa la desalación?.** C.I.R.C.E. (Centro de Investigación y Consumos Energéticos) Universidad de Zaragoza. 2002.
123. Valiente-Barderas, A. **Historia de la destilación.** Educación Química. Noviembre 1995.
124. Weilin Qu, I.M. **Film boiling heat transfer in two phase micro-channel heat sinks I. Experimental investigation and assessment of correlation methods.** International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 2755-2771.
125. Weilin Qu, I.M. **Film boiling heat transfer in two phase micro-channel heat sinks II. Annular two phase flow model.** International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 2773-2784.
126. Werther, J.; Ogada, T. **Sewage sludge combustion.** Process in Energy and Combustion Science 25 (1999) 55- 116.
127. Yu-hao Qiu; Zhen-Hua Liu. **Boiling heat transfer of water on smooth tubes in a compact staggered tube bundle.** Applied Thermal Engineering 24 (2004) 1431-1441-
128. Zarza Mora, E. CIEMAT. **Desalación del agua mediante energías renovables.** Ponencia en el Encuentro medioambiental almeriense: en busca de soluciones. 1998.

129. Zeng, H.; Diao, N.; Fang, Z. **Heat transfer analysis of boreholes in vertical ground heat exchangers.** International Journal of Heat and Mass Transfer 46 (2003) 4467-4481.

## Indice de tesis consultadas

130. *Abad Sempere, A.J.* **Caracterización del fenómeno de la dispersión para la monitorización de reactores químicos mediante sistemas de análisis en flujo.** Dpto. de Ingeniería Textil y Papelera. U.P.V.
131. *Al-Momami, F.* **Combination of photo-oxidation processes with biological treatment.** Departament d'Enginyeria Química I Metal·lúrgia. Universitat de Barcelona. Junio 2003.
132. *Arques Sanz, A.* **Métodos de oxidación avanzada para el tratamiento de las aguas residuales de la industria aceitunera.** Dpto. de Ingeniería Textil y Papelera. Escuela Politécnica Superior de Alcoy. U.P.V. 2001.
133. *Cadenas Romero, A.* **Criterios para caracterizar las aguas y fangos procedentes de tratamientos secundarios, para su utilización en regadíos en las Islas Baleares.** Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. U.P.V. Septiembre de 1988.
134. *Cháfer Nácher, M.* **Deshidratación osmótica de corteza de naranja (valencia late) y mandarina (satsuma).** Departamento de Tecnología de los Alimentos. U.P.V. 2000. Valencia.
135. *Comas Matas, J.* **Development, implementation and evaluation of an activated sludge supervisory system for the granollers WWTP.** Universitat de Girona. 2003.
136. *Cortés De La Fuente, Ch.* **Supervisory system in waste water treatment plants: sistematise their implementation.** Universitat de Girona. 2004.
137. *Falco Giaccaglia, S.* **Comportamiento de los nutrientes en un estuario estratificado: caso del delta del Ebro.** Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. U.P.V. 2003. Valencia.
138. *García Castelló, E.* **Tratamiento de disoluciones de sacarosa mediante técnicas de membrana para su concentración y reutilización. Optimización de las condiciones de operación.** Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. UPV. 2002. Valencia.
139. *Igual Muñoz, A.* **Corrosión galvánica y análisis de imagen de aleaciones metálicas en máquinas de absorción de LiBr.** Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. U.P.V. 2001. Valencia.
140. *Lloret Boscá, G.* **Vertido cero en la industria de electrocincado del acero.** Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. UPV. 2003. Valencia.
141. *Méndez Romero, F.* **Estudio de la salinidad, sodicidad y metales pesados presentes en suelos regados por la acequia de Favara bajo un enfoque espacio-temporal.** Departamento de Producción Vegetal. U.P.V. 2003. Valencia.

142. *Reyes Labarta, J.A.* **Diseño de columnas de rectificación y extracción multicomponente. Cálculo del reflujo mínimo.** Universidad de Alicante. 1998. Alicante.
143. *Rodríguez, M.* **Fenton and UV-vis based advanced oxidation proceses in wastewater treatment: degradation, mineralization and biodegradability enhancement.** Departament d'Enginyeria Química I Metal.lúrgia. Universitat de Barcelona. Abril 2003.
144. *Tenorio Sanz, M<sup>a</sup> Dolores.* **Estudio de metales pesados y otros parámetros indicativos de la calidad de las aguas del río Jarama.** Dpto. de Nutrición y Bromatología. Universidad Complutense de Madrid. 1988.

### Páginas web consultadas

145. <http://www.upv.es>
146. <http://www.miliarium.com>
147. <http://www.monografias.com>
148. <http://www.emison.com>
149. <http://civil.udg.es/normacivil>
150. [http://www.infoagro.com/citricos/informes/calidad\\_zumo.asp](http://www.infoagro.com/citricos/informes/calidad_zumo.asp)
151. <http://ba1.impnet.com/fmc-catania/spanish.htm>
152. <http://www.mty.itesm.mx>
153. <http://www.circe.cps.unizar.es>
154. [http://www.infoagro.com/riegos/energia\\_solar.asp](http://www.infoagro.com/riegos/energia_solar.asp)
155. <http://www.precessfood.com>
156. <http://www.fmcfoodtech.com>
157. <http://www.espaqfe.com.ar>
158. <http://www.cepis.org.pe>
159. <http://www.lafacu.com/apuntes/fisica/termodinII/default.htm>
160. [http://www.ictnet.es/+ptorres/Castella/desaliniza\\_es.htm](http://www.ictnet.es/+ptorres/Castella/desaliniza_es.htm)
161. <http://www.hohcanarias.net/>
162. <http://www.coastal.co.gov>
163. <http://www.carreteros.org>
164. <http://www.condorchem.com>
165. <http://www.inter-tape.com>
166. <http://www.surfaquim.com>
167. <http://www.asiain-asesores.com/rev8/pag82.htm>
168. <http://www.cidetec.es>

#### BIBLIOGRAFÍA

---

169. <http://www.uclm.es/users/higueras/MAM/index.htm> (*Higueras, P; Oyarzun, R. Curso de minería y medio ambiente.* Universidad de Castilla la Mancha.)
170. <http://www.lenntech.com>
171. <http://www.astdr.cdc.gov>
172. <http://www.nlm.nih.gov./medlineplus/spanish/ency/002418.htm>
173. <http://www.epa.gov/>
174. <http://www.wateryear2003.org> (2003 Año Internacional del Agua Dulce. UNESCO.)
175. <http://www.biologia.org>

## ANEXOS

---

A.1.- Legislación relativa a los vertidos de metales al medio	239
A.2.- Anexo fotográfico	263
A.3.- Anexo de usos potenciales de la tecnología empleada	277
A.4.- La contaminación por metales: El caso de Aznalcóllar	291



## A.1.- Anexo legislativo

---

En el presente anexo se muestra un listado de los documentos legislativos relacionados con el tema tratado en la Tesis Doctoral “Evaluación del rendimiento de recuperación de vertidos contaminados por iones de metales pesados mediante técnicas evaporativas. Análisis energético y económico.

Los textos legales con los que se ha trabajado se han ordenado en el presente anexo de la siguiente manera: En primer lugar se han separado aquellos que pertenecen al ámbito de las aguas de aquellos otros relativos a los residuos. Tras esta separación, se ha seguido una estructura interna como la que se muestra:

### **1.- Legislación sobre aguas:**

- 1.1.- INTERNACIONAL
- 1.2.- UNIÓN EUROPEA
- 1.3.- ESTATAL
  - 1.3.1.- Marítimas
  - 1.3.2.- Continentales
  - 1.3.3.- Residuales
  - 1.3.4.- Contaminación de las aguas
- 1.4.-COMUNIDAD VALENCIANA

### **2.- Legislación sobre residuos:**

- 2.1.- INTERNACIONAL
  - 2.1.1.- Residuos peligrosos
- 2.2.- UNIÓN EUROPEA
  - 2.2.1.- Residuos peligrosos
  - 2.2.2.- Otros residuos
- 2.3.- ESTATAL
  - 2.3.1.- Residuos peligrosos
  - 2.3.2.- Residuos industriales

## 1.- Legislación sobre aguas

---

### 1.1.- Internacional

---

**Convenio** para la protección del Mar Mediterráneo contra la contaminación, hecho en Barcelona el 16 de Febrero de 1976, y Protocolos anexos (Instrumento de ratificación de 17 de Diciembre de 1976).

*BOE 44, de 21-02-78*

**Convención de las Naciones Unidas** sobre Derecho del Mar, 1982.

**Convenio de Bonn** , hecho en 1983, sobre la Protección del Mar del Norte.

**Instrumento de ratificación** de la convención de las Naciones Unidas sobre los Derechos del Mar, hecha en Montego Bay el 10 Diciembre 1982.

*BOE de 14-02-97*

**Instrumento de Ratificación** del Convenio ( **Convenio OSPAR** ) para la protección del Medio Ambiente Marino del Atlántico del Nordeste, hecho en París el 22 de Septiembre de 1992 .

*BOE 150, de 24-06-98*

**Instrumento de ratificación** de la Parte XI de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar de 10 de diciembre de 1982, hecho en Nueva York el 28 de Julio de 1994 .

*BOE de 13-02-97*

**Enmiendas** de las regla 2 y nueva regla 9 del anexo V, aprobadas por el Comité de Protección del Medio Marino de la Organización Marítima Internacional en su 37 período de sesiones el 14 de septiembre de 1995 mediante Resolución MEPC.65(37). (Firma 15-7-97)

*BOE 178, de 26-07-97*

**Instrumento de aceptación** por parte de España del anexo V y apéndice 3 del Convenio para la protección del medio marino del Atlántico Nordeste (hecho en París el 22 de septiembre de 1992, publicado en el "Boletín Oficial del Estado" número 150, de 24 de junio de 1998), adoptado en Sintra (Portugal) el 23 de julio de 1998.  
*BOE de 21-02-01*

**Enmiendas al Convenio** para la Protección del Mar Mediterráneo contra la Contaminación, hecho en Barcelona el 10 de junio de 1995.

*BOE 173, de 19-07-04*

## **1.2.- Unión Europea**

---

**Directiva del Consejo 75/440/CEE, de 16 de Junio de 1975**, relativa a la calidad requerida para las aguas superficiales destinadas a la producción de agua potable en los Estados Miembros.

*DOCE 194/L, de 25-07-75*

**Directiva 76/160/CEE del Consejo, de 8 de Diciembre de 1975**, relativa a la Calidad de las Aguas de Baño.

*DOCE 31/L, de 05-02-76*

**Directiva 76/464/CEE del Consejo, de 4 de Mayo de 1976**, relativa a la Contaminación causada por determinadas Sustancias Peligrosas vertidas en el Medio Acuático de la Comunidad.

*DOCE 129/L, de 18-05-76*

**Directiva 80/68/CEE del Consejo, de 17 de Diciembre de 1979**, relativa a la Protección de las Aguas Subterráneas contra la Contaminación causada por determinadas Sustancias Peligrosas.

**Directiva del Consejo 82/176/CEE, de 22 de Marzo de 1982**, relativa a los valores límite y a los objetivos de calidad para los vertidos de mercurio del sector de la electrólisis de los cloruros alcalinos.

*DOCE 81/L, de 27-03-81*

**Resolución del Consejo CEE, de 7 de Febrero de 1983**, relativa a la lucha contra la contaminación de las aguas.

*DOCE 46/C, de 17-02-83*

**Directiva del Consejo 83/513/CEE, de 26 de Septiembre de 1983**, relativa a los valores límite y a los objetivos de calidad para los vertidos de cadmio.

*DOCE 291/L, de 24-10-85*

**Decisión del Consejo 86/85/CEE, de 6 de Marzo de 1986**, por la que se establece un sistema comunitario de información para el control y la disminución de la contaminación en el mar o en las aguas interiores.

*DOCE 77/L, de 22-03-86*

**Decisión del Consejo 88/346/CEE, de 16 de Junio de 1988**, por la que se modifica la Decisión 86/85/CEE por la que se establece un sistema comunitario de información para el control y la disminución de la contaminación causada por el vertido de hidrocarburos y de otras sustancias peligrosas en el mar.

*DOCE 158/L, de 25-06-88*

**Directiva del Consejo 91/271/CEE, de 21 de Mayo de 1991**, sobre el tratamiento de las aguas residuales urbanas.

*DOCE 135/L, de 30-05-91*

**Propuesta de Directiva del Consejo** por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

*DOCE 184/C, de 17-06-97*

**Directiva 98/15/CE de la Comisión de 27 de Febrero de 1998** por la que se modifica la Directiva 91/271/CEE del Consejo en relación con determinados requisitos establecidos en su anexo I.

*DOCE 67/L, de 07-03-98*

**Propuesta modificada de Directiva del Consejo** por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

*DOCE 108/C, de 07-04-98*

**Informe especial nº 3/98** sobre la aplicación por parte de la Comisión de la política y la actuación de la Unión Europea en el ámbito de la contaminación de las aguas, acompañado de las respuestas de la Comisión

*DOCE 191/C, de 18-06-98*

**Comunicación** de la Comisión al Consejo, al Parlamento Europeo y al Comité Económico y Social sobre Política de Tarificación y Uso Sostenible de los Recursos Hídricos.

*COM(2000) 477 final, hecha en Bruselas el 26-07-00*

**Directiva 2000/60/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Octubre de 2000 por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

*DOCE 327/L, de 22-12-00*

**Convocatoria de propuestas** en el campo de la cooperación comunitaria contra la contaminación marina accidental o deliberada.

*DOCE 105/C, de 05-04-01*

### **1.3.- Estatal**

---

#### **1.3.1.- MARÍTIMAS**

**Ley 22/1988, de 28 de Julio**, de Costas.

*BOE 181, de 29-07-88*

**Real Decreto 1471/1989 de 1 de Diciembre**, aprobando el Reglamento General para Desarrollo y ejecución de la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas.

*BOE 297, de 12-12-89*

**Orden de 30 de Octubre de 1992**, por la que se determina la cuantía del canon de ocupación y aprovechamiento de dominio público marítimo-terrestre, establecido en el artículo 84 de la Ley 22/1988, de 28 de Julio, de Costas.

*BOE 297, de 12-12-89*

### **Vertidos al Mar desde Tierra**

**Resolución de 23 de Abril de 1969**, de Normas Provisionales sobre Instalaciones depuradoras y de Vertido de Aguas Residuales al Mar.

BOE de 20-06-69

C.e BOE de 04-08-69

**Real Decreto 258/1989, de 10 de Marzo**, por el que se establece la normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar.

*BOE 64, de 16-03-89*

**Orden de 31 de Octubre de 1989**, por la que se establecen normas de emisión, objetivos de calidad, métodos de medida de referencia y procedimientos de control relativos a determinadas sustancias peligrosas contenidas en los vertidos desde tierra al mar.

*BOE 271, de 11-11-89*

**Orden de 9 de Mayo de 1991**, por la que se modifica el anejo V de la Orden de 31 de octubre de 1989, por la que se establecen normas de emisión, objetivos de calidad, métodos de medida de referencia y procedimientos de control relativos a determinadas sustancias peligrosas contenidas en los vertidos desde tierra al mar.

*BOE de 15-05-91*

**Orden de 28 de Octubre de 1992**, por la que se amplía el ámbito de aplicación de la Orden de 31 de octubre de 1989 a cuatro nuevas sustancias peligrosas que pueden formar parte de determinados vertidos al mar.

*BOE de 27-07-93*

**Orden de 13 de Julio de 1993**, por la que se aprueba la instrucción para el proyecto de conducciones de vertidos desde tierra al mar.

*BOE de 27-07-93*

*C.e BOE de 13-08-93*

### **1.3.2.- AGUAS CONTINENTALES**

**Orden de 28 de Julio de 1974**, por la que se aprueba el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Tuberías de Abastecimiento de Agua y se crea una Comisión Permanente de Tuberías de Abastecimiento de Agua y Saneamiento de Poblaciones.  
*BOE de 02/03-10-74*

**Ley 29/1985, de 2 de Agosto**, de Aguas.

*BOE 189, de 08-08-85*

**Real Decreto 2473/1985, de 27 de Diciembre**, por el que se aprueba la tabla de vigencia a que se refiere el apartado 3 de la disposición derogatoria de la ley 29/1985, de 2 de agosto, de aguas.

*BOE 2, de 02-01-86*

**Real Decreto 849/1986, de 11 de Abril**, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos Preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas

*BOE 103, de 30-04-86*

**Ley 14/1986, de 25 de Abril**, General de Sanidad.

*BOE 102, de 29-04-86*

**Real Decreto 927/1988, de 29 de Julio**, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas.

*BOE 209, de 31-08-88*

**Orden de 27 de Febrero de 1991**, por la que se modifica y complementa la Orden Ministerial de 12 de Noviembre de 1987, relativa a Normas de Emisión, Objetivos de Calidad y Métodos de Medición de Referencia para Vertidos de determinadas Sustancias Peligrosas.

*BOE 53, de 02-03-91*

**Orden de 25 de Mayo de 1992** que modifica la Orden de 12 de Noviembre de 1987, sobre normas de emisión, objetivos de calidad y métodos de medición de referencia relativos a determinadas sustancias nocivas o peligrosas contenidas en los vertidos.  
*BOE 129, de 29-05-92*

**Real Decreto 117/1992, de 14 de Febrero**, por el que se actualiza la composición del consejo nacional del agua.

**Real Decreto 531/1992, de 22 de Mayo**, por el que se adoptan medidas administrativas especiales para la gestión de los recursos hidráulicos, al amparo del artículo 56 de la ley de aguas.

*BOE 127, de 27-05-92*

**Real Decreto 1315/1992, de 30 de Octubre**, por el que se modifica parcialmente el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos Preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, aprobado por el Real Decreto 849/ 1986, de 11 de abril.

*BOE 288, de 01-12-92*

**Real Decreto 419/1993, de 26 de Marzo**, por el que se actualiza el importe de las sanciones establecidas en el artículo 109 de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de aguas, y se modifican determinados artículos del reglamento del dominio público hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril.

*BOE 89, de 14-04-93*

**Real Decreto 1771/1994, de 5 de Agosto**, de adaptación a la ley 30/1992, de 26 de noviembre, de régimen jurídico de las administraciones publicas y del procedimiento administrativo común, de determinados procedimientos administrativos en materia de aguas, costas y medio ambiente.

*BOE 198, de 19-08-94*

**Real Decreto 1541/1994, de 8 de Julio**, que modifica el Anexo I del Reglamento de la Administración pública del agua y de la planificación hidrológica aprobado por el Real Decreto 927/1988, de 29 de Julio de 1988.

*BOE 179, de 28-07-94*

**Real Decreto 484/1995, de 7 de Abril**, sobre Medidas de Regularización y de Control de Vertidos.

*BOE 95, de 21-04-95, C.e BOE de 13-05-95*

**Ley 46/1999, de 13 de Diciembre**, de modificación de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.

*BOE 298, de 14-12-99*

**Real Decreto 995/2000, de 2 de Junio**, por el que se fijan objetivos de calidad para determinadas sustancias contaminantes y se modifica el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de Abril.

*BOE 21-06-00*

**Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de Julio**, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas.

*BOE 176, de 24-07-01*

**Libro Blanco del Agua.** Síntesis. Fuente : Ministerio de Medio Ambiente.

**Corrección de errores del texto refundido de la Ley de Aguas**, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio.

*BOE 287, de 30-11-01*

**Real Decreto 606/2003, de 23 de Mayo**, por el que se modifica el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.

*BOE 135, de 06-06-03*

**Orden MAM/1873/2004, de 2 de Junio**, por la que se aprueban los modelos oficiales para la declaración de vertido y se desarrollan determinados aspectos relativos a la autorización de vertido y liquidación del canon de control de vertidos regulados en el Real Decreto 606/2003, de 23 de mayo, de reforma del Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento de Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los Títulos preliminar, I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. *BOE 147, de 18-06-04*

### **1.3.3.- AGUAS RESIDUALES**

**Orden Ministerial de 4 de Septiembre de 1959**, que reglamenta el vertido de aguas residuales.

*BOE de 10-09-59*

**Orden Ministerial de 23 de Marzo de 1960**, que aprueba las Normas Técnicas de la Orden Ministerial de 4 de Septiembre de 1959.

*BOE de 02-04-60*

**Orden Ministerial de 9 de Octubre de 1962**, que aprueba las Normas Técnicas de la Orden Ministerial de 4 de Septiembre de 1959.

*BOE de 23-10-62*

**Orden Ministerial de 14 de Abril de 1980**, sobre medidas para corregir la contaminación por vertidos.

*BOE 98, de 23-04-80*

**Orden de 23 de Diciembre de 1986** por la que se dictan normas complementarias en relación con las autorizaciones de vertidos de aguas residuales.

*BOE 312, de 30-12-86*

**Orden de 12 de Noviembre de 1987** sobre normas de emisión, objetivos de calidad y métodos de medición de referencia relativos a determinadas sustancias nocivas o peligrosas contenidas en los vertidos de aguas residuales.

*BOE 280, de 23-11-87*

*C.e BOE de 18-04-88*

**Orden de 13 de Marzo de 1989** por la que se incluye en la de 12 de noviembre de 1987, la normativa aplicable a nuevas sustancias nocivas o peligrosas que pueden formar parte de determinados vertidos de aguas residuales.

*BOE 67, de 20-03-89*

**Orden de 19 de Diciembre de 1989** por la que se dictan normas para la fijación en ciertos supuestos de valores intermedios y reducidos del coeficiente k, que determina la carga contaminante del canon de vertido de aguas residuales.

*BOE 307, de 23-12-89*

**Orden de 27 de Febrero de 1991** por la que se modifica el anexo V de la Orden del 12-11-1987, relativa a normas de emisión, objetivos de calidad y métodos de medición de referencia, para vertidos de determinadas sustancias peligrosas, en especial los correspondientes a hexaclorociclohexano.

*BOE 53, de 02-03-91*

**Orden de 28 de Junio de 1991** por la que se amplía el ámbito de aplicación de la Orden de 12 de noviembre de 1987 a cuatro sustancias nocivas o peligrosas que puedan formar parte de determinados vertidos.

*BOE 162, de 08-07-91*

**Orden de 25 de Mayo de 1992**, por la que se modifica la Orden Ministerial de 12 de Noviembre de 1997, sobre normas de emisión, objetivos de calidad y métodos de medición de referencia relativos a determinadas sustancias nocivas o peligrosas contenidas en los vertidos de aguas residuales.

*BOE 129, de 29-05-92*

**Real Decreto 484/1995, de 7 de Abril**, sobre Medidas de Regularización y de Control de Vertidos.

*.BOE 95, de 21-04-95*

*C.e BOE de 13-05-95*

**Resolución de 28 de Abril de 1995** de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, por el que se aprueba el ***Plan Nacional de Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales (PNSD)***

*BOE 113, de 12-05-95*

**Resolución de 14 de Junio de 2001**, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo de Consejo de Ministros, de 1 de junio de 2001, por el que se aprueba el ***Plan Nacional de Lodos de Depuradoras de Aguas Residuales 2001-2006***.

*BOE 166, de 12-07-01*

#### **1.3.4.- CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS**

**Decreto 93/1968, de 18 de Enero**, sobre Prohibición del Uso de Detergentes no Biodegradables.

*BOE 25, de 29-01-68*

**Decreto 3157/1968, de 26 de Diciembre**, por el que se modifica el Decreto 93/1968, de 18 de Enero, sobre Prohibición del Uso de Detergentes no Biodegradables.

*BOE 313, de 30-12-68*

**Orden de 13 de Marzo de 1989** por la que se incluye en la de 12 de noviembre de 1987, la normativa aplicable a nuevas sustancias nocivas o peligrosas que pueden formar parte de determinados vertidos de aguas residuales.

*BOE 67, de 20-03-89*

**Orden de 28 de Junio de 1991** por la que se amplía el ámbito de aplicación de la orden de 12 de noviembre de 1987 a cuatro sustancias nocivas o peligrosas que puedan formar parte de determinados vertidos.

*BOE 162, de 08-07-91*

**Ley 16/2002, de 1 de Julio**, de prevención y control integrados de la contaminación.

*BOE 157, de 02-07-02*

## 2.- Legislación sobre residuos

---

### 2.1.- Internacional

---

#### **2.1.1.- RESIDUOS PELIGROSOS**

**Convenio de Basilea de 22 de Marzo de 1989**, sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación.

*BOE 227, de 22-09-94*

**Instrumento de Ratificación del Convenio de Basilea** sobre el Control de los Movimientos Transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de Marzo de 1989.

*BOE de 22-09-94*

**Enmienda al anejo I y de la adopción de los anejos VIII y IX del Convenio de Basilea** sobre control de movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación, hecho en Basilea el 22 de marzo de 1989, adoptados en Kuching (Malasia) el 27 de febrero de 1998 .

*BOE 120, de 20-05-99*

## **2.2.- Unión Europea**

---

### **2.2.1.- RESIDUOS PELIGROSOS**

**Directiva del Consejo 76/769/CEE, de 27 de Julio de 1976**, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos.

*DOCE 262/L, de 27-09-76*

**Directiva 86/280/CEE del Consejo de 12 de Junio de 1986** relativa a los valores límite y los objetivos de calidad para los residuos de determinadas sustancias peligrosas comprendidas en la lista I del Anexo de la Directiva 76/464/CEE.

*DOCE 181/L, de 04-07-86*

**Directiva del Consejo 91/157/CEE, de 18 de Marzo de 1991**, relativa a las pilas y a los acumuladores que contengan determinadas materias peligrosas.

*DOCE 78/L, de 26-03-91*

**Directiva del Consejo 91/689/CE, de 12 de Diciembre de 1991**, relativa a residuos peligrosos

*DOCE 377/L, de 31-12-91*

**Directiva de la Comisión 93/86/CEE, de 4 de Octubre de 1993**, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 91/157/CEE del Consejo, relativa a las pilas y a los acumuladores que contengan determinadas materias peligrosas.

*DOCE 264/L, de 23-10-93*

**Directiva 94/31/CE, del Consejo, de 27 de Junio de 1994**, por la que se modifica la Directiva 91/689/CEE relativa a Residuos Peligrosos.

*DOCE 168/L, de 02-07-94*

**Directiva 94/67/CE del Consejo, de 16 de Diciembre de 1994**, relativa a la incineración de Residuos Peligrosos.

**Directiva 94/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de Diciembre de 1994**, por la que se modifica por decimocuarta vez la Directiva 76/769/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos.

*DOCE 365/L, de 31-12-94*

**Decisión del Consejo de 22 de Diciembre de 1994**, por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del Artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.

*DOCE 356/L, de 31-12-94.*

**Posición común 18/96, aprobada por el Consejo el 4 de Marzo de 1996**, con vistas a la adopción de la Directiva 96/.../CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de..., que modifica la Directiva 67/548/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.

*DOCE 134/C, de 06-05-96*

**Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo** por la que se modifica por octava vez la Directiva 67/548/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.

*DOCE 73/C, de 13-03-96*

**Decisión de la Comisión de 17 de Abril de 1996**, por la que se establece un formulario para la presentación de información con arreglo al apartado 3 del artículo 8 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.

*DOCE 116/L de 11-5-96*

**Dictamen del Comité Económico y Social** sobre la "Propuesta de Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica por octava vez la Directiva 67/548/CEE del Consejo, relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas". *DOCE 153/C, de 28-05-96*

**Directiva 96/54/CE de la Comisión de 30 de Julio de 1996**, por la que se adapta por vigésima segunda vez, al progreso técnico la Directiva 67/548/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.  
*DOCE 248/L, de 30-09-96*

**Directiva 96/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 3 de Septiembre de 1996**, que modifica la Directiva 67/548/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.  
*DOCE 236/L, de 18-9-96*

**Directiva 96/82/CE del Consejo de 9 de Diciembre de 1996**, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.  
*DOCE 10/L, de 14-01-97*

**Directiva 97/56/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de Octubre de 1997**, por la que se modifica por decimosexta vez la Directiva 76/769/CEE relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos.  
*DOCE 333/L, de 04-12-97*

**Dictamen del Comité Económico y Social**, sobre la “Propuesta de Directiva del Consejo por la que se modifica la Directiva 94/67/CE relativa a la incineración de residuos peligrosos”.  
*BOE 176, de 24-07-01*

**Directiva 98/73/CE de la Comisión, de 18 de Septiembre de 1998**, por la que se adapta, por vigésimo cuarta vez, al progreso técnico la Directiva 67/548/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.  
*DOCE 305/L, de 16-11-98*

**Directiva 98/98/CE de la Comisión, de 15 de Diciembre de 1998**, por la que se adapta, por vigésima quinta vez, al progreso técnico la Directiva 67/548/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas en materia de clasificación, embalaje y etiquetado de las sustancias peligrosas.

*DOCE 355/L, de 30-12-98*

**Directiva 98/101/CE de la Comisión, de 22 de Diciembre de 1998**, por la que se adapta al progreso técnico la Directiva 91/157/CEE del Consejo relativa a las pilas y a los acumuladores que contengan determinadas materias peligrosas.

*DOCE 1/L, de 05-01-99*

**Decisión de la Comisión, de 3 de Mayo de 2000**, que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.

*DOCE 226/L, de 06-09-00*

**Decisión de la Comisión, de 22 de Enero de 2001**, que modifica la Decisión 2000/532/CE que sustituye a la Decisión 94/3/CE por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos y a la Decisión 94/904/CE del Consejo por la que se establece una lista de residuos peligrosos en virtud del apartado 4 del artículo 1 de la Directiva 91/689/CEE del Consejo relativa a los residuos peligrosos.

*DOCE 47/L, de 16-02-01*

**Propuesta Modificada de Directiva** del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se modifica por decimonovena vez la Directiva 76/769/CEE del Consejo que limita la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos.

*DOCE 96/C E, de 27-03-01*

**Decisión del Consejo, de 14 de Mayo de 2001**, relativa a la firma, en nombre de la Comunidad Europea, del **Convenio de Estocolmo** sobre contaminantes orgánicos persistentes.

**Directiva 2001/91/CE de la Comisión, de 29 de Octubre de 2001**, por la que se adapta al progreso técnico por octava vez el anexo I de la Directiva 76/769/CEE del Consejo relativa a la aproximación de las disposiciones legales, reglamentarias y administrativas de los Estados miembros que limitan la comercialización y el uso de determinadas sustancias y preparados peligrosos (hexacloroetano).

*DOCE 286/L, de 30-10-01*

**Propuesta de Directiva** del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a las restricciones a la comercialización y uso de determinados hidrocarburos aromáticos policíclicos en aceites diluyentes y en neumáticos (vigésimoséptima modificación de la Directiva 76/769/CEE del Consejo).

*COM/2004/0098 final - COD 2004/0036*

### **2.2.2.- OTROS**

**Directiva del Consejo 75/442/CEE, de 15 de Julio de 1975**, relativa a los residuos (con las modificaciones de la Directiva del Consejo 91/156/CEE, de 18 de Marzo de 1991).

*DOCE 194/L, de 27-07-75*

*DOCE 78/L, de 26-03-91*

**Decisión 76/431/CEE de la Comisión, de 21 de Abril de 1976**, relativa a la creación de un Comité en materia de gestión de residuos.

*DOCE 115/L, de 01-05-76*

**Resolución del Consejo, de 7 de Mayo de 1990**, sobre la Política en Materia de Residuos.

*DOCE 122/C, de 18-05-90*

**Directiva 91/156/CEE, del Consejo, de 18 de Marzo de 1991**, por la que se modifica la Directiva 75/442/CEE relativa a los Residuos.

*DOCE 78/L, de 26-03-91*

**Decisión de la Comisión de 20 de Diciembre de 1993**, por la que se establece una lista de residuos de conformidad con la letra a) del Artículo 1 de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa a los residuos ( Catálogo Europeo de Residuos ).

*DOCE 5/L, de 7-1-94*

**Decisión de la Comisión de 24 de Mayo de 1996**, por la que se adaptan los Anexos II A y II B de la Directiva 75/442/CEE del Consejo relativa los residuos

*DOCE 135/L, de 6-6-96*

**Directiva 96/61/CE del Consejo, de 24 de Septiembre de 1996**, relativa a la prevención y al control integrados de la contaminación ( Directiva IPPC).

**Decisión de la Comisión de 27 de Mayo de 1997** sobre cuestionarios para informes de los Estados miembros relativos a la aplicación de determinadas directivas referentes al sector de los residuos (aplicación de la Directiva 91/692/CEE) (97/622/CE).

*DOCE 256/L, de 19-09-97*

**Propuesta de Directiva** del Consejo relativa al vertido de residuos.

*DOCE 156/C, de 08-97*

**Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de Abril de 1999**, relativa al vertido de residuos.

*DOCE 182/L, de 16-07-99*

**Decisión de la Comisión, de 17 de Noviembre de 2000**, sobre el cuestionario para los Estados miembros acerca de la aplicación de la Directiva 1999/31/CE sobre vertido de residuos ( Notificada con el nº 3318/C del 2000).

*DOCE 298/L, de 25-11-00*

**Decisión 2850/2000/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de Diciembre de 2000**, por la que se establece un marco comunitario de cooperación en el ámbito de la contaminación marina accidental o deliberada. *DOCE 332/L, de 28-12-00*

**Decisión de la Comisión de 16 de Enero de 2001**, por la que modifica la Decisión 2000/532/CE en lo que se refiere a la Lista de Residuos.

*DOCE 47/L, de 16-02-01*

**Decisión de la Comisión, de 14 de Febrero de 2001**, relativa a la decisión sobre la posible inclusión de determinadas sustancias activas en el anexo I de la Directiva 91/414/CEE del Consejo.

*DOCE 49/L, de 20-02-01*

## **2.3.- Estatal**

---

### **2.3.1.- RESIDUOS PELIGROSOS**

**Decreto 2414/1961, de 30 de Noviembre**, por el que se aprueba el Reglamento de actividades molestas, insalubres, nocivas y peligrosas.

*BOE 292, de 07-12-61*

**Orden de 15 de Marzo de 1963**, por la que se aprueba una Instrucción que dictan normas complementarias para la aplicación del Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas.

**Decreto 3494/1964, de 5 de Noviembre**, por el que modifican determinados artículos del Reglamento de Actividades Molestas, Insalubres, Nocivas y Peligrosas.

*BOE 267, de 06-11-64*

**Ley 20/1986, de 14 de Mayo**, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

*BOE 120, de 20-05-86*

***Norma derogada***

**Real Decreto 833/1988 de 20 de Julio** por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos.

*BOE 182, de 30-7-88*

**Orden de 13 de Octubre de 1989**, por la que se determinan los métodos de caracterización de los residuos tóxicos y peligrosos.

*BOE 270, de 10-11-89*

**Real Decreto 1078/1993, de 2 de Julio**, sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.

*BOE 216, de 03-07-93. C.e BOE 277, de 19-11-93*

**Plan Nacional de Residuos Peligrosos (1995-2000)**

(Texto aprobado por el Consejo de Ministros el 17 de Febrero de 1995)

**Real Decreto 363/1995, de 10 de Marzo**, por el que se aprueba el reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas.

*BOE 133, de 05-06-95*

**Resolución de 28 de Abril de 1995**, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente y Vivienda, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 17 de febrero de 1995, por el que se aprueba el ***Plan Nacional de Residuos Peligrosos***.

*BOE 114 de 13-05-95*

**Real Decreto 45/1996, de 19 de Enero**, por el que se regulan diversos aspectos relacionados con las pilas y los acumuladores que contengan determinadas materias peligrosas.

*BOE 48 de 24-02-96*

**Orden de 21 de Febrero de 1997** por la que se modifica el Anexo I del Reglamento sobre Notificación de Sustancias Nuevas y Clasificación, Envasado y Etiquetado de sustancias Peligrosas, aprobado por Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo.

*BOE 59, de 10-03-97*

**Real Decreto 952/1997, de 20 de Junio**, por el que se modifica el Reglamento para la ejecución de la Ley 20/1986, de 14 de mayo, Básica de Residuos Tóxicos y Peligrosos, aprobado mediante Real Decreto 833/1988, de 20 de julio.

*BOE 160, de 05-07-97*

**Real Decreto 700/1998, de 24 de Abril**, por el que se modifica el Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por el Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo.

*BOE 110, de 08-05-98*

**Real Decreto 1425/1998, de 3 de Julio**, por el que se modifica el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos, aprobado por el Real Decreto 1078/1993, de 2 de julio.

*BOE 159, de 04-07-98*

**Orden de 11 de Septiembre de 1998** por la que se modifican los anexos I y VI del Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo.

*BOE 223, de 17-09-98*

**Orden de 5 de Octubre de 2000** por la que se modifican los anexos I, III, IV y VI del Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por el Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo.

*BOE 243, de 10-10-00*

**Orden de 5 de Abril de 2001** por la que se modifican los anexos I, IV, V, VI y IX del Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por el Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo.

*BOE 94, de 19-04-01*

**Real Decreto 507/2001, de 11 de Mayo**, por el que se modifica el Reglamento sobre notificación de sustancias nuevas y clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, aprobado por el Real Decreto 363/1995, de 10 de marzo.

*BOE 114, de 12-05-01*

**Real Decreto 255/2003, de 28 de Febrero**, por el que se aprueba el ***Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.***

*BOE 54, de 04-03-03*

*C.e BOE 56, de 05-03-04*

**Corrección de errores del Real Decreto 255/2003**, de 28 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos.

*BOE 56, de 05-03-04*

**2.3.2.- RESIDUOS INDUSTRIALES**

**Real Decreto 937/1989, de 21 de Julio**, por la que se regula la concesión de ayudas del Plan Nacional de Residuos Industriales.

*BOE 179, de 28-07-89*

**Resolución de 24 de Julio de 1989**, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el ***Plan Nacional de Residuos Industriales*** y se constituye la Comisión de Seguimiento del mismo.  
BOE 179, de 28-07-89

**Real Decreto 1254/1999, de 16 de Julio**, sobre prevención de accidentes mayores en determinadas actividades industriales.

*BOE de 20-07-99*

## A.2.- Anexo fotográfico

---

En el presente anexo fotográfico se muestran las imágenes captadas a lo largo del periodo investigador relativas al montaje y desarrollo de los ensayos en el laboratorio. Se pretende con este anexo mostrar gráficamente la disposición y funcionamiento de aquellos aparatos y utensilios empleados durante la investigación así como el MEPA diseñado y ensayado.

Se ha realizado una selección de entre la totalidad de fotografías tomadas en el laboratorio durante el periodo investigador, con la intención de mostrar tan sólo aquellas imágenes que resultan especialmente descriptivas por sí mismas o muestran algún elemento de especial interés.

Las fotografías que se muestran en las páginas siguientes se han ordenado en tres apartados distintos:

- Fotografías del MEPA #1
- Fotografías del MEPA #2
- Fotografías de elementos individuales

## Fotografías del MEPA #1

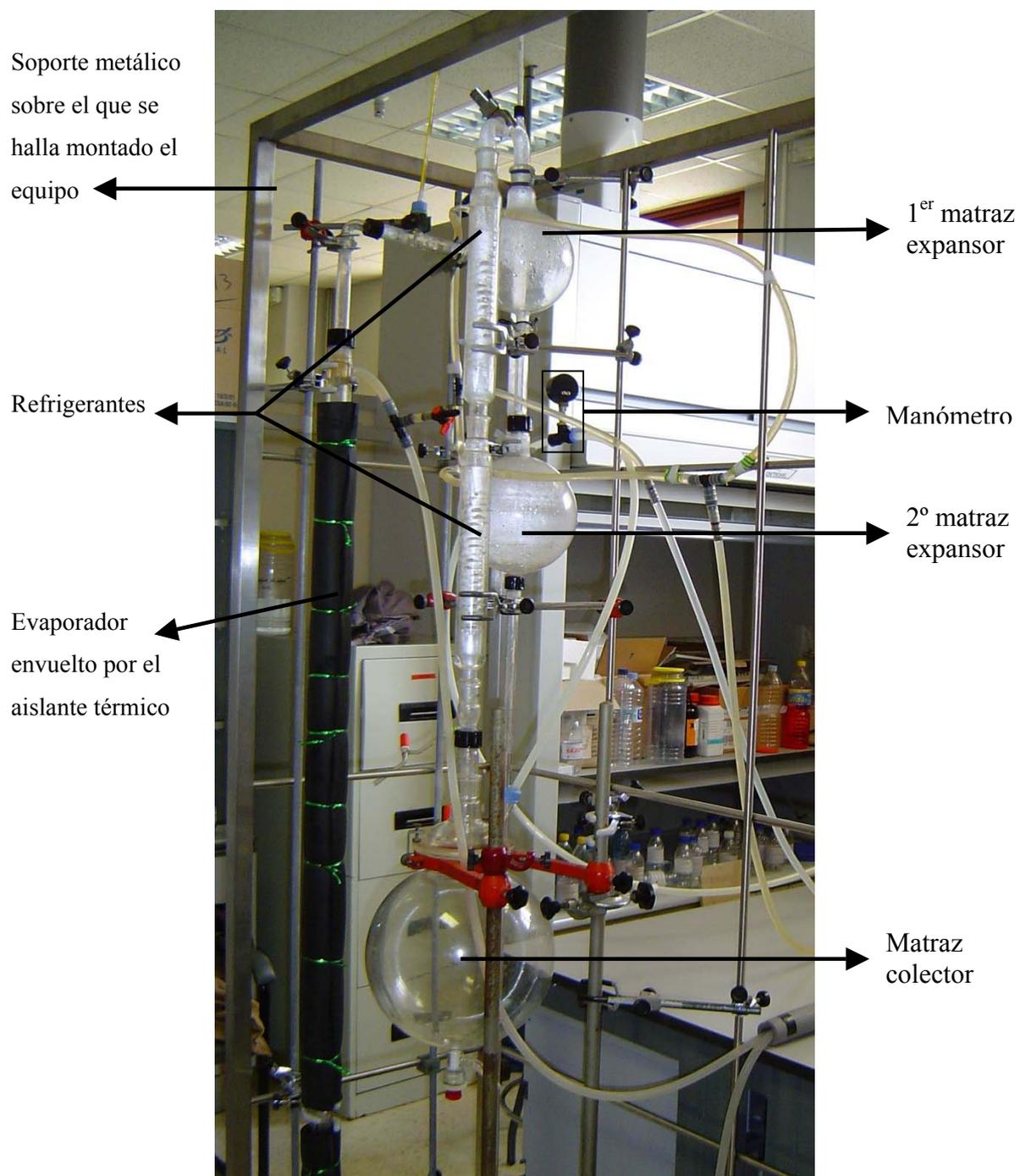


Figura A.2.1.- Vista general del MEPA #1. Identificación de algunos de sus diversos componentes. Laboratorio TECAR

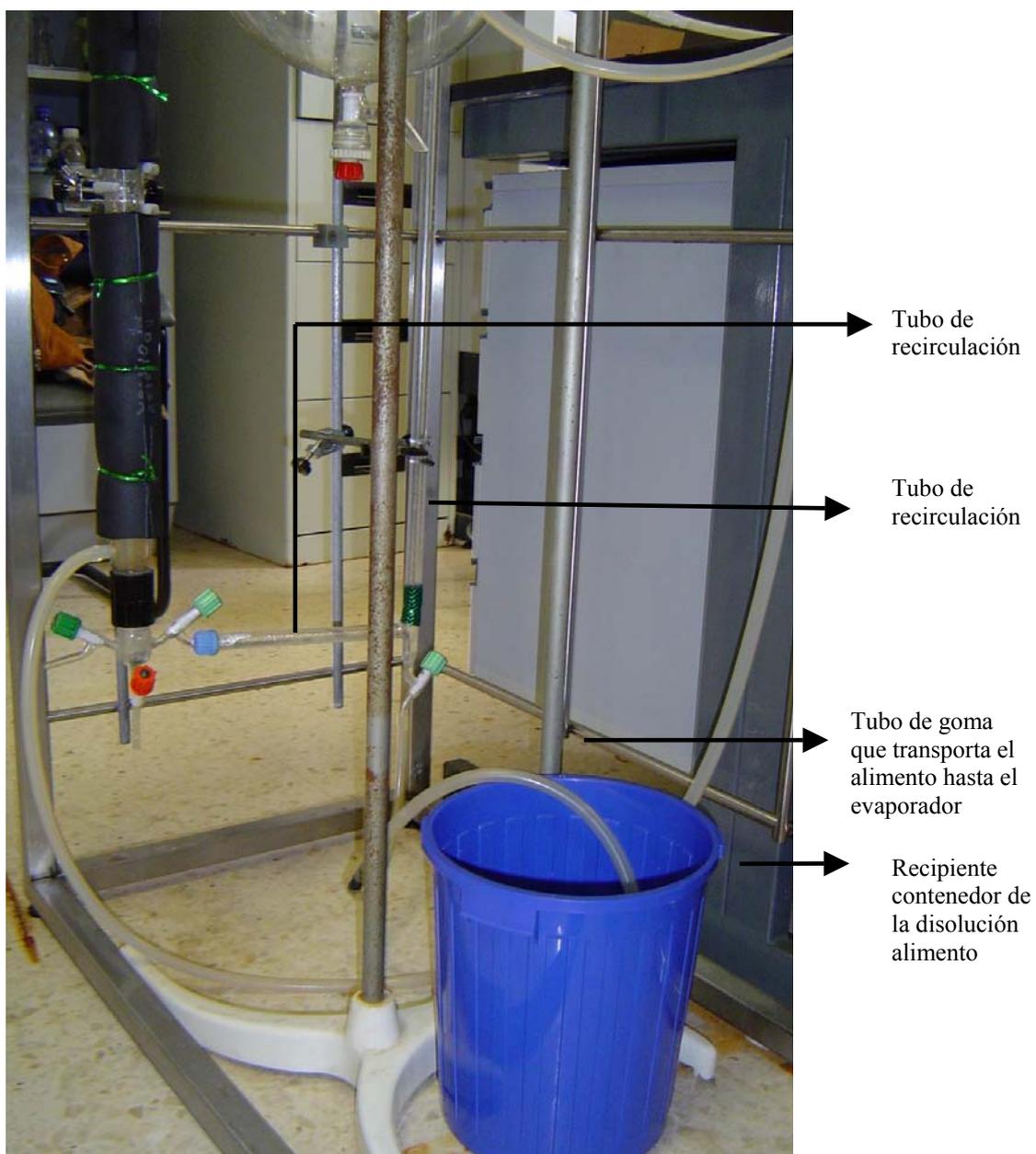


Figura A.2.2.- Detalle de la parte inferior del MEPA #1. Identificación de diversos componentes del sistema. Laboratorio TECAR



**Figura A.2.3.- Detalle del intercambiador de tubo recto vertical empleado en la configuración MEPA #1. Doble tubo cilíndrico concéntrico sin el aislamiento térmico**

Fotografías del MEPA #2

---



Figura A.2.4.- Vista general del MEPA #2. Sistema evaporador en funcionamiento. Laboratorio TECAR

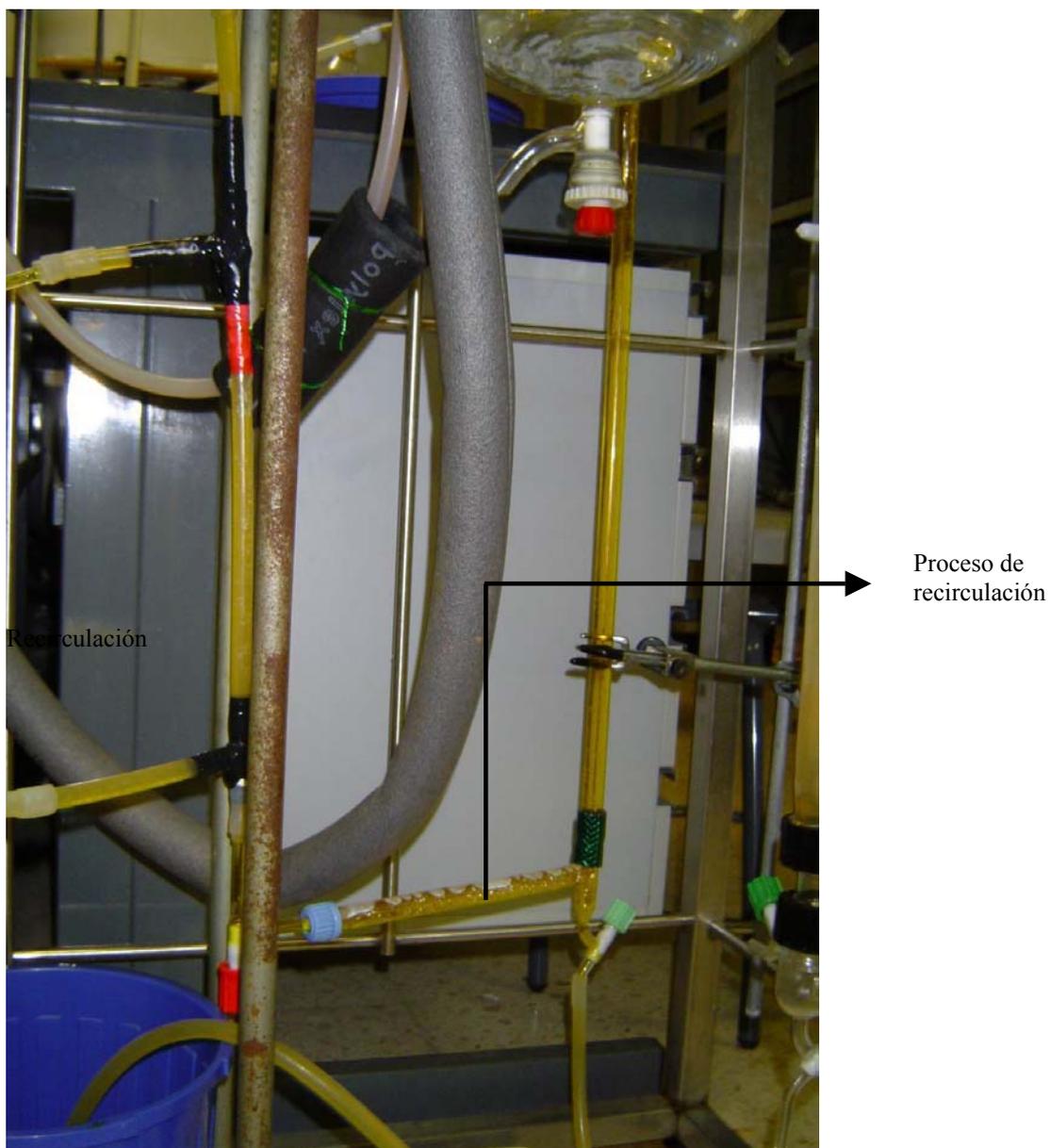


Figura A.2.5.- Detalle de la parte inferior del MEPA #2. Funcionamiento de la recirculación con disolución de dicromato.  
Laboratorio TECAR



Figura A.2.6.- Detalle de la parte superior del MEPA #2. Se muestra la salida de la mezcla líquido vapor desde el intercambiador de doble columna en espiral hacia los matracos de expansión



Figura A.2.7.- Detalle de la volatilización en el MEPA #2



Figura A.2.8.- Detalle del fenómeno de condensación. Se observa la condensación del destilado en el serpentín refrigerador del MEPA #2

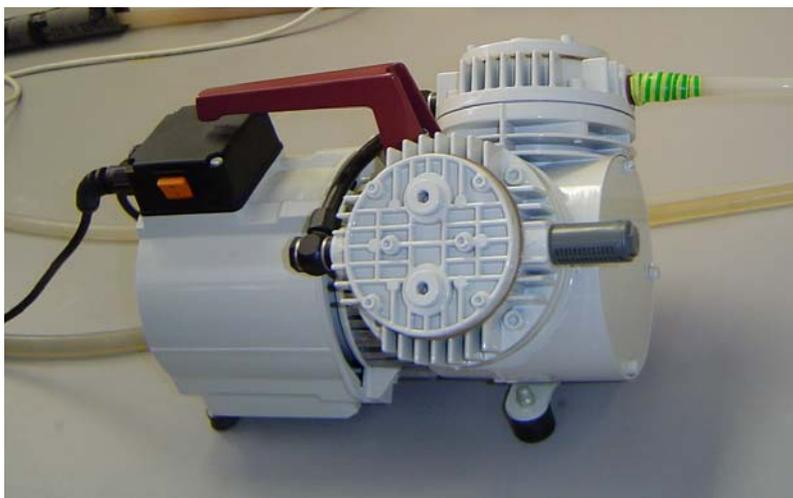
## Fotografías de elementos individuales

---



Llave que permite la salida del agua caliente hacia el intercambiador.

Figura A.2.9.- Calentador EDESA utilizado



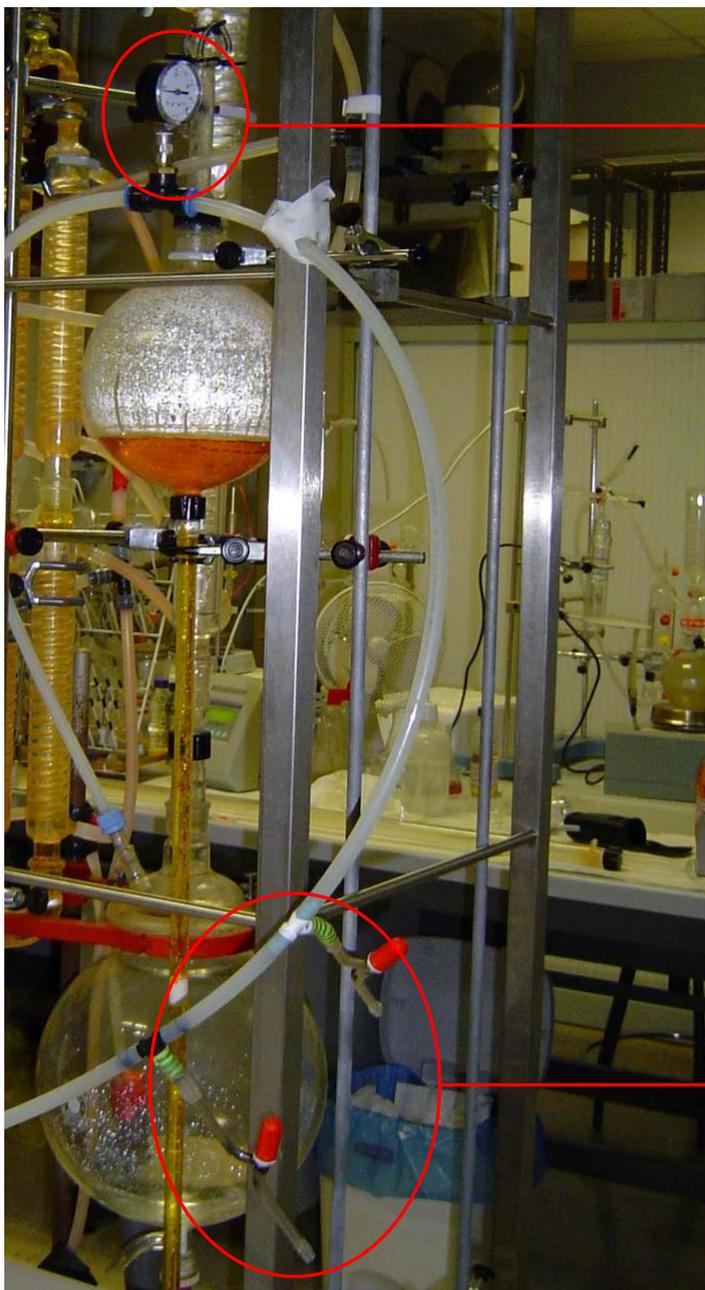
**Figura A.2.10.- Bomba de vacío KNF Neuberger N 035.3. Bomba que suministra el vacío necesario para el correcto funcionamiento del sistema mepa diseñado y ensayado**



**Figura A.2.11.- Bomba de impulsión de 60w para la recirculación del líquido de calefacción**



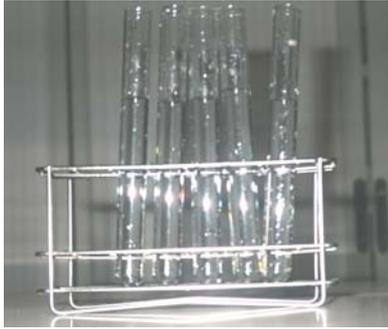
**Figura A.2.12.- Conductímetro CRISON GPL 31. Utilizado para la determinación de conductividades durante el periodo investigador**



Manómetro indicador del vacío suministrado al sistema

Llaves para el control del vacío ejercido en el sistema

Figura A.2.13.- Detalle de los elementos de control de vacío



**Figura A.2.14.- Muestras de diluciones de  $\text{NiSO}_4$  y  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$**



**Figura A.2.15.- Recipiente de polipropileno. Contenedor del líquido alimento previa entrada del mismo al sistema**



**Figura A.2.16.- Detalle del matraz colector. Se observa la caída continuada de destilado a consecuencia del funcionamiento del MEPA durante la realización de la fotografía**



## ANEXO III.- Aplicaciones industriales de los MEPA

---

Este tercer anexo recopila las aplicaciones industriales más comunes de los MEPA diseñados y ensayados en la presente Tesis Doctoral y empleados en diversos ámbitos productivos del tejido industrial valenciano. Este anexo no pretende una descripción detallada de todas y cada una de las aplicaciones potenciales de la tecnología ensayada sino la identificación de aquellas que se han considerado más destacables.

### A.3.1.- Desalación de aguas de mar y salobres

---

Una de las aplicaciones a escala industrial de los procedimientos térmicos es la desalación de agua para obtención de un agua ultrapura a partir de aguas de mar y salobres.

Los procesos MSF (Multi Stage Flash) y MED (Multi Effect Distillation) son de hecho ampliamente utilizados para la desalación de agua de mar y salobre en aquellas áreas geoeconómicas del planeta en las que el coste de los combustibles fósiles no es significativamente elevado (Oriente Medio principalmente).

Los procesos de membrana, entre los que destaca la Ósmosis Inversa, son predominantemente empleados allí donde la factura energética es considerablemente más elevada que en el caso anteriormente expuesto.

Hoy en día, las plantas desaladoras superan con creces los 27 Hm<sup>3</sup>/d (Uche, J et al. 2001), de los cuales la mitad se obtiene de agua de mar y la otra mitad de aguas salobres. También es destacable la importante implantación de estos métodos de obtención de agua potable en el Medio Oriente donde se genera el 60% de la producción total de agua desalada del mundo.

Por otra parte es interesante constatar los porcentajes de agua desalada generados según procedimientos, presentándose para ello la Figura A.4.1.1., así como la distribución por áreas geográficas del total desalado en el planeta (Figura A.4.1.2.).

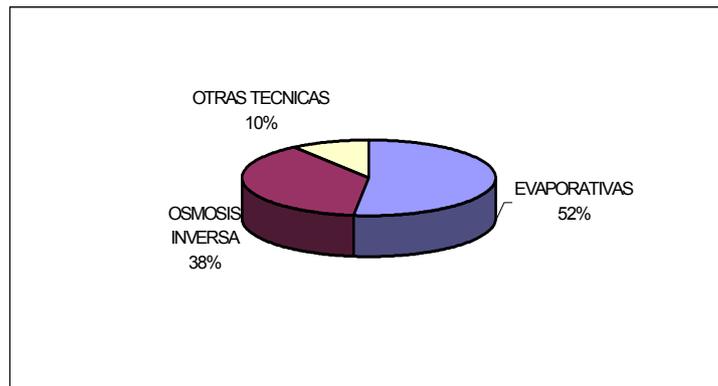


Figura A.3.2.- Distribución geográfica de la desalación en el planeta. Porcentajes. Uche, J et al. 2001

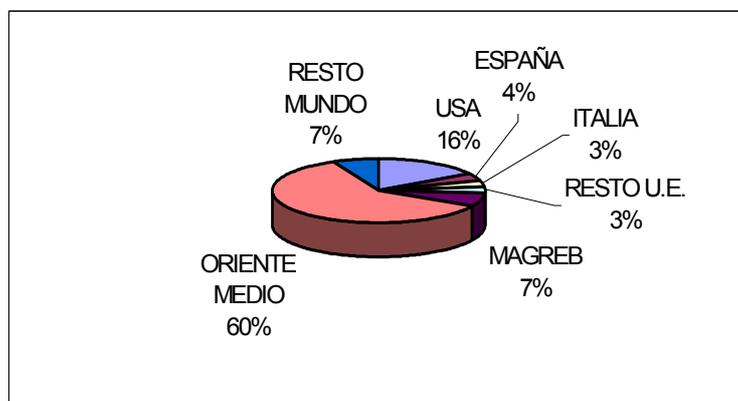


Figura A.3.2.- Distribución geográfica de la desalación en el planeta. Porcentajes. Uche, J et al. 2001

No se presenta esquema de funcionamiento alguno de estos métodos de desalación por considerarse que han sido adecuadamente descritos y esquematizados en el Capítulo IV.

### A.3.2.- Obtención de aceites esenciales

---

Los aceites esenciales, que se obtienen principalmente de fuentes vegetales como flores y hojas de plantas, son sustancias aromáticas de naturaleza oleosa. Estos aceites se utilizan en una amplia gama de industrias (alimentarias, farmacéuticas...) con el objetivo principal de aromatizar sus productos y hacerlos más atractivos al consumidor.

En muchos casos, los aceites esenciales se obtienen como subproducto de una actividad industrial, como es el caso de las industrias de fabricación de zumos, aunque también existen empresas cuyo objetivo es exclusivamente la obtención de estos aceites, como

es el caso de las destinadas a la obtención de aceites de Lavanda o Espliego (*Lavandula vera*) y Romero (*Rosmarinus officinalis*).

En ambos casos, estas fábricas utilizan intercambiadores de calor, de diseño similar a los MEPA utilizados, para concentrar el jugo del que se extraerá el aceite. Después de someter al jugo a una evaporación, se obtiene por una parte el jugo concentrado y por otra, agua caliente que sale del evaporador conteniendo la esencia aromática de la planta o fruto que se haya utilizado. Mediante la aplicación de procesos de separación, se puede obtener por un lado el agua y por otro la esencia de la fruta.

En función del tamaño de la empresa, se obtendrá una cantidad determinada de aceites esenciales. La figura A.4.2. muestra un diagrama de flujo para la obtención de aceites esenciales en una industria de tratamiento de frutas para obtención de zumos:

### A.3.- USOS POTENCIALES DE LOS MEPA

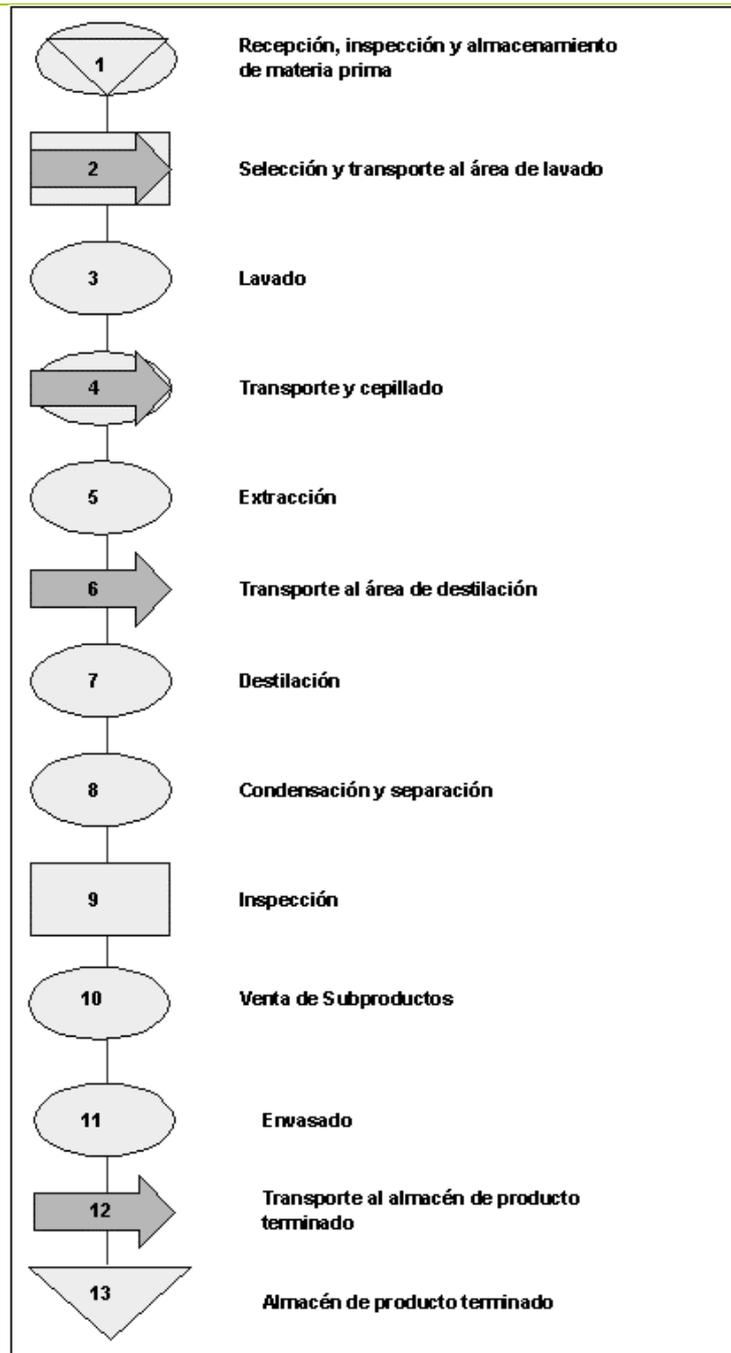


Figura A.3.2.- Diagrama industrial de obtención de aceites esenciales de frutas. [www.spice.gob.mx](http://www.spice.gob.mx).

Las distintas etapas que aparecen en el diagrama de flujos mostrado en la figura A.4.2. son las siguientes:

- 1) *Recepción, inspección y almacenamiento de materia prima*: en esta primera etapa se revisa el estado del fruto: color, ausencia de golpes, consistencia, una textura, signos de putrefacción...

- 2) *Selección y transporte al área de lavado*: Con el empleo de una cinta transportadora se conduce el fruto hasta la zona de lavado. En este punto se procede a la eliminación de los frutos que no estén en buenas condiciones.
- 3) *Lavado*: Se utilizan chorros de agua a presión proyectada en distintas direcciones para someter a las frutas a un lavado completo.
- 4) *Transporte y cepillado*: Esta etapa persigue eliminar las capas de suciedad del fruto que no se hayan eliminado en el paso anterior.
- 5) *Extracción*: Existen diversas opciones de prensado y extracción del jugo. Una opción muy extendida es el empleo de una prensa helicoidal de paredes perforadas. En ella se aplasta el fruto con la finalidad extraer todo su jugo. En esta etapa se separa el jugo de la cáscara, bagazo y la semilla, los cuales, en el caso particular de la naranja, se utiliza en la fabricación del pienso animal.
- 6) *Transporte al área de destilación*: El jugo extraído es conducido a un tanque donde queda almacenado hasta su destilación.
- 7) *Destilación*: Mediante un MEPA se procede a la concentración del jugo y la obtención de un destilado que contiene los aceites esenciales.
- 8) *Condensación y separación*: Unos condensadores provocan el cambio de fase de vapor a líquido. Más tarde, una decantación separa el agua del aceite .
- 9) *Inspección*: Se observan muestras del aceite obtenido para valorar su aspecto, que debe ser cristalino, sin turbidez y de olor limpio.
- 10) *Venta de subproductos*: Subproductos como la cáscara, el bagazo y la semilla del fruto, pueden ser aprovechados para la fabricación de pienso animal.
- 11) *Envasado*: El aceite esencial se introduce en recipientes de vidrio ahumado para proteger el producto de la luz. Se suele emplear recipientes de un litro de capacidad.
- 12) *Transporte al almacén de producto terminado*: Tras las etapas descritas, los recipientes son transportados al almacén.
- 13) *Almacén de productos terminados*: Se deposita el producto hasta su comercialización.

### A.3.3.- Fabricación de productos de higiene personal

En la fabricación de champú, gel de ducha y otros productos de higiene personal, se añaden aromas a estos productos para que adquieran un olor característico deseado y atractivo para el consumidor. Para ello, se pueden utilizar los aromas de los frutos que están presentes en la corriente de agua que sale del evaporador, después de someterlos a un proceso de evaporación, en las industrias de obtención de jugo de frutas. De este modo el champú puede tener un olor a limón, naranja u otros de diferentes frutas.

La figura A.4.3 muestra un diagrama de flujo para la obtención de champú:

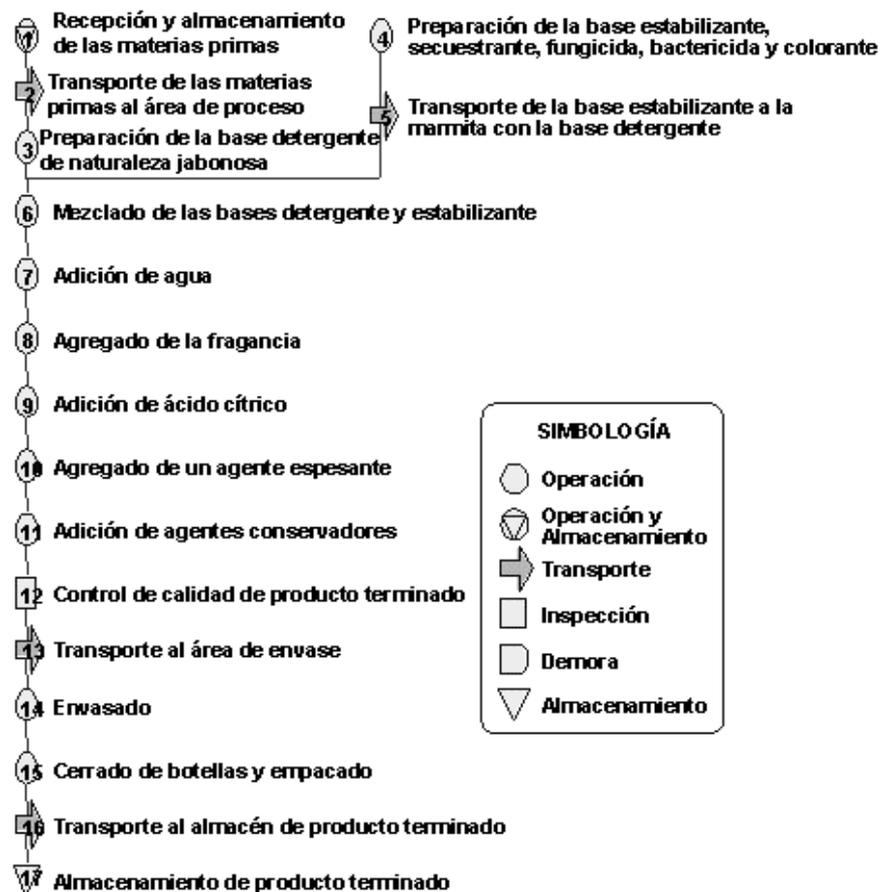


Figura A.3.3.- Diagrama industrial de fabricación de champú. [www.spice.gob.mx](http://www.spice.gob.mx).

A continuación se describe sintéticamente cada paso:

- 1) Almacenamiento de los productos necesarios en la elaboración del champú (jabón 30 %, ácido oleico, fragancias, conservantes...). Se requiere una humedad en torno al 50 % para que los productos almacenados no se estropeen.
- 2) Traslado de los productos hasta el área de proceso.
- 3) Pesado de los materiales en las cantidades especificadas en la fórmula e introducción en una marmita a 80°C con una adición de un 5 % de agua desionizada previamente calentada. La mezcla se agita constantemente.
- 4) Adición de dietanolamina, sosa cáustica, perborato de sodio, trietanolamina, secuestrante y colorante en otra marmita. La citada mezcla es incrementada en un 7,5 % de agua desionizada y se calienta con vapor a 80 °C.
- 5) Transporte de la base estabilizante hasta la base detergente, con una bomba dosificadora, situada a la salida de la marmita de la base estabilizante.
- 6) La mezcla se agita manteniendo la temperatura a 80 °C.
- 7) Tras homogeneización, se disminuye la temperatura hasta 40 °C y se adiciona agua, en la cantidad correspondiente a la fórmula deseada.
- 8) Fase de adición de la fragancia que se desee, manteniéndose la agitación constante.
- 9) Adición de ácido cítrico para ajustar el pH de la mezcla y control del mismo a un valor de 8,5 aproximadamente.
- 10) Adición al producto de agentes espesantes para que se adquiera el grado de viscosidad deseado.
- 11) Adición de agentes conservadores para el control de la durabilidad del producto, sin hongos ni otros microorganismos. Continúa la agitación.
- 12) Control de calidad para verificar cumplimiento de la normativa vigente.
- 13) Realización del transporte hacia el área de envasado, mediante tubería.
- 14) Introducción del producto en los envases para comercialización, con etiquetado resistente al agua, en el que se indican los datos de fabricante, composición del producto y código de barras.
- 15) Cierre de recipientes y colocación en cajas.

16) Transporte de cajas hasta el almacén.

17) Almacenaje aconsejado mínimo de 24 h previo a su comercialización.

### A.3.4.- Fabricación de productos de limpieza del hogar

Es muy frecuente el uso de aromas de pino y limón para mejorar la percepción olfativa de los productos de limpieza. Estos aromas generalmente se compran a industrias de fabricación de zumo y extractos vegetales que se suelen utilizar evaporadores en sus procesos aunque también se pueden producir directamente en las industrias de fabricación de productos de limpieza.

En la figura A.4.4. se presenta el diagrama de flujo de una industria de fabricación de productos de limpieza del hogar:

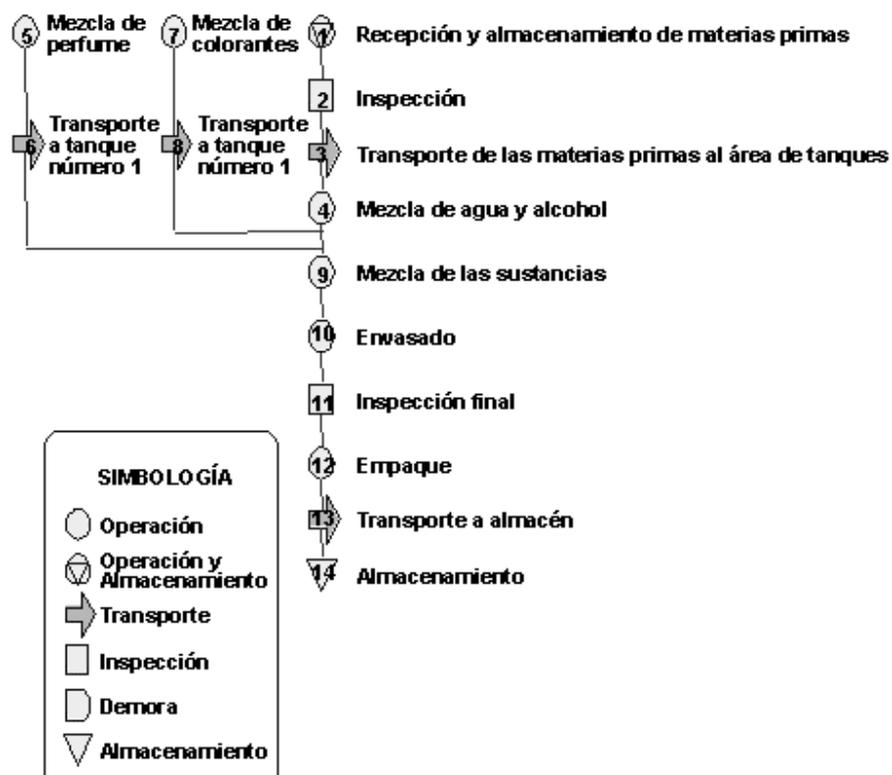


Figura A.3.4.- Diagrama industrial de fabricación de champú. [www.spice.gob.mx](http://www.spice.gob.mx).

Las fases que se muestran en la figura A.4.3. se describen a continuación de manera sintética:

- 1) *Recepción y almacenamiento de la materia prima*: Control y almacenaje del alcohol etílico desnaturalizado, perfume de limón, colorantes y demás productos a emplear.
- 2) *Inspección de la materia prima*: Tratamiento estadístico de inspección para el correcto estado de la materia prima a emplear.
- 3) *Transporte de las materias primas al almacén de tanques*:
- 4) *Mezcla de agua y alcohol*: Se mezcla agua y alcohol y se agita hasta que se homogenice
- 5) *Mezcla del perfume*: En otro depósito se procede a la preparación del perfume mezclando nonil-fenol etoxilado, cloruro de benzalconio y el perfume deseado. La mezcla se realiza en frío y está en continua agitación.
- 6) *Transporte al tanque primero*: la mezcla del perfume preparada se se vierte en el tanque que contiene la mezcla hidroalcohólica.
- 7) *Mezclado de colorantes*: en un tercer tanque se disuelven en base acuosa los colorantes y se agita hasta perfecta homogeneización.
- 8) *Transporte al tanque primero*: El colorante disuelto se transporta mediante bombeo al primer tanque.
- 9) *Mezcla de las sustancias*: Mezclado de las sustancias del tanque primero, segundo y tercero, agitándose hasta completa homogeneización.
- 10) *Envasado*: Llenado de los envases que habrán de contener el producto final.
- 11) *Inspección final*: Análisis de las muestras para control de calidad previo a la comercialización
- 12) *Empaquetamiento*: Los envases se embalan en cajas de cartón y se precintan.
- 13) *Transporte al almacén*: Para su contabilización y almacenamiento.
- 14) *Almacenamiento*: Hasta que proceda su distribución.

**A.3.5.- Obtención de sal**

La sal común, cloruro sódico (NaCl), se obtiene generalmente de depósitos geológicos, lagos salados o del agua de mar. Este compuesto químico presenta color blanco, es inodoro y debe contener un 97 % mínimo de NaCl en base seca para poder ser comercializado como tal. Por supuesto, ésta debe estar exenta de cualquier sustancia tóxica. Por otra parte, además del NaCl, en la sal común, pueden aparecer otros componentes como: Yodatos o yoduros de sodio o potasio, nitrato de potasio, sulfato de sodio, sólidos insolubles en agua y otros compuestos no tóxicos por ingestión.

En estos procesos se tiene, si se emplea un evaporador para el proceso, por una parte un caudal de agua y por otra una corriente de salmuera, que se somete a una desecación para la obtención de sal. Se muestra a continuación un diagrama de flujo de un aprovechamiento industrial para la obtención de sal:

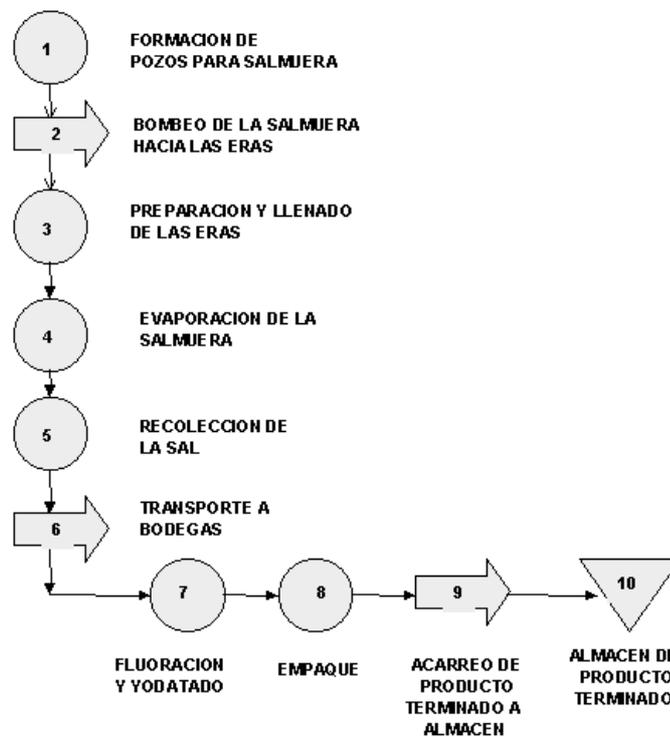


Figura A.3.5.- Diagrama industrial de fabricación de sal. [www.spice.gob.mx](http://www.spice.gob.mx).

A continuación se describe brevemente el proceso mostrado en la figura A.4.5:

- 1) *Pozos de salmuera*. Son agujeros de captación, de 1 a 2 metros de profundidad, con un diámetro aproximadamente de 50 cm, para la entrada del agua de mar.
- 2) *Bombeo de salmuera a las eras*. Se emplean bombas de impulsión para el transporte de la salmuera desde el pozo hasta las eras, donde será almacenada.
- 3) *Llenado de las eras*. Las eras son superficies llanas con forma rectangular generalmente y de un área aproximada de 10 m<sup>2</sup>. Las eras suelen estar cubiertas por una superficie plástica en la que se deposita la salmuera.
- 4) *Evaporación de las eras*. Mediante una evaporación natural (también pueden emplearse evaporadores como los ensayados), se realiza la evaporación, obteniéndose la formación de cristales de sal.
- 5) *Recolección de la sal*. Tras su desecación, se recoge la sal formada en las eras.
- 6) *Transporte hacia las bodegas*. La sal se conduce y almacena en las bodegas.
- 7) *Fluoración y yodatación*. La sal almacenada se conduce al interior de tanques para añadirle flúor y yodo, si corresponde.
- 8) *Empaquetamiento*. Tras la preparación de la sal, ésta se introduce en sacos de tamaño oportuno.
- 9) *Acarreo del producto terminado al almacén*. Transporte de la sal al almacén.
- 10) *Almacenamiento del producto terminado*. El producto acabado, es conducido a unos almacenes protegidos de la intemperie, con una ventilación adecuada, para una buena conservación durante su fase de almacenamiento previa a la comercialización.

La utilización de evaporadores industriales tipo MEPA o similares, reduce mucho la duración del proceso y, aunque los costes de fabricación pueden verse aumentados en los capítulos de coste de maquinaria, amortización y consumo energético, en general supone un avance y una necesidad menor de espacio para las eras, durante la evaporación natural.

### A.3.6.- Fabricación de leche en polvo

---

La leche en polvo es básicamente leche deshidratada, con un muy bajo porcentaje de humedad. La deshidratación de la leche presenta una serie de ventajas como facilitar el transporte y el almacenamiento, siendo esto ideal para los casos en los que es necesario un desplazamiento de considerables volúmenes de leche (por ejemplo en el caso de emergencias humanitarias y el transporte de alimentos básicos). Además, la aplicabilidad es muy elevada, pudiéndose utilizar la leche en polvo no sólo para la preparación de leche líquida para el consumo sino también en la obtención de leches fermentadas y quesos.

Para la concentración de la leche se emplean con frecuencia los procesos de evaporación. Es por ello por lo que se presenta a continuación una descripción sintetizada de la obtención de leche deshidratada:.

- 1) *Almacenamiento* previo de la leche para su manipulación.
- 2) *Concentración* de la leche mediante la aplicación de procesos de evaporación hasta obtener aproximadamente un 40% del extracto seco total.
- 3) *Deshidratación* de la leche concentrada mediante la pulverización por medio de una turbina en una corriente de aire caliente a la temperatura de 150 °C.
- 4) *Enfriamiento* de la materia sólida obtenida.
- 5) *Homogeneización* mediante pulverización de las partículas sólidas obtenidas para mejorar sus propiedades, especialmente la solubilidad y el aspecto visual.
- 6) *Envasado*. La leche deshidratada se envasa en bolsas al vacío o en cajas metálicas herméticamente cerradas, previa adición de CO<sub>2</sub> para eliminar el riesgo de alteración de la leche durante su almacenaje.

### **A.3.7.- Fabricación de yogurt**

---

Los procesos de evaporación también son frecuentemente utilizados en la fabricación del yogurt.. La obtención de este producto lácteo es, sintéticamente, la siguiente:

1.- *Preparación de la mezcla base:* Que consta de dos fases diferenciadas entre sí:

1.1.- Estandarización del contenido en grasa de la leche:

El contenido de grasa de la leche varía entre un 0,1 y un 10 % en los distintos tipos de yogures. Para la estandarización se aplican las siguientes técnicas: Eliminación de la parte grasa de la leche, mezclado de leche entera y descremada, adición de grasa a la leche entera o descremada y/o utilización de centrifugas para la estandarización.

1.2.- Estandarización del extracto seco magro de la leche:

Los productos lácteos de buena calidad se consiguen empleando un extracto seco total entre un 14 y un 15 %, pero si el yogurt es de los denominados “enriquecidos”, este valor asciende a un 30 %. Además, debe tenerse en cuenta que, en la obtención de un yogurt de consistencia y viscosidad agradable es muy importante la concentración de sólidos no grasos de la leche. El aumento de extracto se logra mediante alguno de los procedimientos siguientes: Concentrando por evaporación, adición de leche en polvo descremada, adición de mazada en polvo, adición de leche en polvo y/o adición de caseína en polvo.

1.3.- Homogenización:

La finalidad de la homogenización es mejorar la viscosidad del producto final, aumentar la consistencia y la estabilidad del

producto. Esto se consigue mediante la adición de presión y calor en condiciones concretas.

2.- *Tratamiento térmico de la mezcla base:*

A 80 a 95 °C durante 5 a 30 minutos, se consigue mejorar las propiedades del yogurt además de eliminar la presencia bacteriana no deseada.

3.- *Enfriamiento entre 40 y 45 °C.* Tras el tratamiento térmico anterior.

4.- *Adición de aditivos:* Se inyecta al producto un cultivo bacteriano concreto que hará cuajar al producto. Junto a este cultivo también se añaden aditivos para mejorar el color, sabor, textura y conservación del yogurt.

5.- *Incubación:* Se trata de facilitar las condiciones más favorables para el desarrollo del cultivo inoculado encargado de la fermentación láctica, así como de la formación de compuestos responsables del sabor y aroma.

## ANEXO IV.- La contaminación por metales: El caso de Aznalcóllar

---

Durante la noche del 24 al 25 de Abril de 1998, una parte de los muros de contención de la balsa de estériles perteneciente a la explotación minera que la empresa Boliden-Aprisa trabajaba en Aznalcóllar (Sevilla), se rompió dando paso a un torrente de aguas y lodos de origen mineral que fluyeron aguas abajo por el río Guadiamar hasta el Parque Nacional de Doñana.

El aprovechamiento minero fue adquirido en 1987 por la empresa Boliden-Aprisa y se utilizaba para la extracción de concentrados de zinc, plata, plomo y cobre, presentes en el suelo de la zona, utilizándose la citada balsa de estériles para el acúmulo de los fangos y aguas residuales del proceso. Tanto las aguas como los lodos acumulados en dicha balsa contenían una elevada cantidad de metales pesados y compuestos químicos que fueron, al producirse la rotura, los que generaron un desastre ambiental de tal importancia que aún hoy, seis años después, sigue teniendo repercusión internacional.

El vertido transformó 4.650 ha de terreno aluvial en una inmensa mancha negra, producto de los más de 2 mill. de m<sup>3</sup> de lodos y 4 mill. de m<sup>3</sup> de aguas con alto contenido en zinc, plomo arsénico, cobre, antimonio, talio y cadmio, liberados al cauce del río Guadiamar. Este hecho supuso la contaminación de 62 km de cauce, terrenos aluviales contaminados en zonas de hasta 1 km de amplitud en torno al eje del río, con espesores de lodos contaminantes de entre 0,1 y 3 m y la llegada de materiales contaminantes a zonas pertenecientes al Parque Nacional de Doñana.

La importancia del accidente provocó una inmediata puesta en marcha de los mecanismos estatales y autonómicos destinados a tal efecto que coordinaron y ejecutaron las tareas de retirada de los lodos y descontaminación de los terrenos afectados. Estas tareas se prolongaron durante todo el año 1998 y gran parte de 1999 y han conseguido una sensible disminución de las concentraciones de contaminantes en el área afectada. El primero de estos mecanismos puestos en marcha fue el denominado Plan de Medidas Urgentes que permitió la retirada de la mayor parte de los lodos en un plazo de siete meses. En segundo lugar, meses más tarde de la puesta en marcha del

primer mecanismo, comenzaba la gestación del Plan de Acción contra los efectos de los vertidos contaminantes. Este Plan de Acción consideraba actuar en la cuenca del Guadiamar como conjunto y no exclusivamente en el área más afectada por el vertido. Así, considerando la cuenca hidrológica del Guadiamar como una unidad, se planteó la recuperación general de la cuenca en dos aspectos que habían decaído mucho: su utilidad como corredor ecológico Sierra Morena – Doñana y su función de sistema hidrológico básico para el tramo bajo del Guadalquivir.

Siguiendo estas directrices, dentro del Plan de Acción anteriormente citado, se proyecta un Programa de Control y Seguimiento de la Calidad Ambiental con una duración prevista de 5 años, en el que se desarrollaron una serie de convenios de investigación que fueron organizados en cuatro líneas básicas de investigación:

- Línea nº1.- Seguimiento, vigilancia, control y remediación de la contaminación del vertido minero de Aznalcóllar.
- Línea nº2.- Diseño del corredor ecológico del Guadiamar.
- Línea nº3.- Restauración ecológica de los ecosistemas del cauce y la llanura aluvial del Guadiamar.
- Línea nº4.- Integración de los sistemas naturales y humanos. La cuenca del Guadiamar.

Los trabajos de investigación y convenios realizados dentro del Programa de Control y Seguimiento de la Calidad Ambiental pueden verse en la tabla A.7.1.:

**Tabla A.4.1.- Trabajos realizados dentro del programa de control y seguimiento de la calidad ambiental**

<b>Línea de investigación.</b>	<b>Programa</b>	<b>Convenio</b>
1.- Seguimiento, vigilancia, control y remediación de la contaminación del vertido minero de Aznalcóllar.	1.1.- Vigilancia y remediación de la contaminación de suelos.	1.- Estudio de la contaminación del suelo y técnicas de tratamiento de inmovilización de metales en la cuenca del Guadiamar.
		2.- Evaluación de la contaminación por elementos traza de una parte de la cuenca del río Guadiamar como referencia para la posible declaración como suelo contaminado.
		3.- Bases científicas del Proyecto de recuperación de suelos contaminados en la cuenca del río Guadiamar.
	1.2.- Vigilancia y remediación de la contaminación en seres vivos	4.- Seguimiento de seres vivos en el área afectada por el vertido de las minas de Aznalcóllar.

ANEXO IV.- LA CONTAMINACIÓN POR METALES: EL CASO DE AZNALCÓLLAR

		5.- Microorganismos como bioindicadores en la evaluación y seguimiento de la toxicología de los lodos piriticos vertidos en la cuenca del Guadiamar.
	1.3.- Biorremediación de la contaminación en suelos mediante técnicas de fitorremediación.	6.- Seguimiento y fitorremediación de los suelos afectados por el vertido de las minas de Aznalcóllar.
		7.- Descontaminación metálica de suelos del área de Aznalcóllar mediante acciones de fitorremediación que impliquen la utilización conjunta de plantas cultivadas y flota autóctona.
	1.4.- Vigilancia y control de la contaminación en el estuario del Guadalquivir.	Contaminación por metales pesados del estuario del Guadalquivir; efectos del accidente minero de Aznalcóllar sobre el medio físico y los organismos marinos.
2.- Diseño del corredor ecológico del Guadiamar.	2.1.- Diseño del corredor ecológico del Guadiamar.	9.- Caracterización de la estructura y funcionalidad de los elementos lineales del paisaje en la cuenca del río Guadiamar.
3.- Restauración ecológica de los ecosistemas del río Guadiamar y su llanura aluvial.	3.1.- Restauración de los procesos hidrogeomorfológicos.	10.- Seguimiento de la dinámica geomorfológica en el río Guadiamar y sus márgenes para la restauración ecodinámica del cauce y la llanura aluvial.
		11.- Estudio del comportamiento hidrológico e hidráulico del río Guadiamar y sus cuencas vertientes en el tramo comprendido entre las confluencias con el río Agrio y el arroyo de la Cigüeña.
	3.2.- Restauración de poblaciones y comunidades vegetales y animales.	12.- Estudio de la microflora de la cuenca del Guadiamar.
		13.- Cartografía de la vegetación potencial y actual de la cuenca del Guadiamar y del corredor fluvial como base para su restauración y seguimiento.
		14.- Composición, estructura, restauración y conservación de las comunidades vegetales en la cuenca del Guadiamar.
		15.- Composición, estructura, restauración y conservación de las comunidades animales de la cuenca del Guadiamar.
		16.- Fauna piscícola de la cuenca del río Guadiamar: estado de conservación, problemática y directrices de restauración.
17.- Situación preoperacional de las poblaciones de mamíferos medianos y grandes que pueden ser afectados por el corredor ecológico del Guadiamar.		
4.- Integración de los sistemas naturales y humanos de la cuenca del Guadiamar.	4.1.- Implementación territorial y socioeconómica del Corredor Verde.	18.- Territorio y Patrimonio. Reconocimiento básico, diagnóstico y avance de propuestas para la correcta integración del ámbito de influencia de la cuenca del Guadiamar en el proyecto de Corredor Verde.
		19.- Análisis socioeconómico y Desarrollo Sostenible en los municipios de la cuenca del Guadiamar.
	4.2.- Vigilancia de la contaminación minera y salud humana.	20 Estudio sobre niveles de metales pesados en la población andaluza: comparación con la población de la zona de influencia del accidente minero de Aznalcóllar.

En la realización de las investigaciones pertenecientes a estas cuatro líneas participaron 28 entidades de las cuales 17 eran Universidades y las otras 11 organismos dependientes del Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

La Consejería de Medio Ambiente de la Comunidad Autónoma de Andalucía financió la totalidad de las investigaciones contenidas en este Plan de Acción, dividiendo éstas en dos fases. La primera, con una duración de tres años, consistente en el análisis profundo de los efectos del vertido en los organismos y ecosistemas, el suministro de información para la realización de las labores de descontaminación y la restauración ecológica, tuvo una dotación económica de 4,8 mill. €. La segunda fase, con una duración de dos años, tuvo una dotación económica de 1,02 mill. € y consistió en el suministro de información para la evaluación de los resultados de las actuaciones de limpieza y descontaminación realizadas hasta el momento.

Por último, de las investigaciones realizadas destacan las siguientes conclusiones:

**Línea de investigación nº1:**

- Existen cantidades importantes de metales y sulfatos en los terrenos afectados por lodos. Los metales, en las condiciones de acidez del vertido, son fácilmente ionizables y biodisponibles.
- Es muy interesante el uso de material de préstamo, como algunas arcillas, para neutralizar la acidez e inmovilizar los metales. La espuma de remolacha azucarera también es muy efectiva.
- En 2001, tres años después del accidente y ya retirados los lodos de la zona afectada, la contaminación por metales en el lecho del Guadiamar, aunque ha disminuido debido a la retirada de los lodos, sigue siendo muy importante en la zona más cercana a la mina y se modera conforme el cauce se aleja del punto de vertido, aunque superando en muchos lugares los valores de no afección a los organismos acuáticos.
- Los eslabones más bajos del ecosistema acuícola están bioacumulando metales. Tal es el caso del fitoplancton, zooplancton y perifiton, en los que se ha detectado un incremento en la concentración de metales. También se ha detectado la desaparición de numerosas especies no tolerantes así como la

proliferación de algunas especies oportunistas (*Ulothrix sp*, *Mougeotia sp* y *Eunotia sp*).

- Las comunidades de macroinvertebrados, muy ricas antes del accidente, han disminuido su diversidad y aumentado su concentración de metales pesados en la biomasa (*Chironomus riparius*, *Ephoron virgo*). Esta afección se va atenuando en los tramos medios y lejanos al punto de vertido. El agua en tramos cercanos al punto de vertido es muy tóxica para algunas especies.
- El cangrejo rojo (*Procambarus Clarkii*) vio disminuida su población debido al vertido. Tres años después (2001) la recuperación está siendo exitosa pese a no haberse alcanzado todavía las densidades poblacionales previas al accidente. La concentración de metales en estos animales es varias veces superior a la que poseían con anterioridad al vertido.
- Las plantas superiores han bioacumulado parte de los metales que quedaron en el suelo, presentándose valores muy superiores a los normales en hojas de Grama (*Cynodon dactylon*) Álamo blanco (*Populus alba*), Acebuche (*Olea esuopaea*) y Encina (*Quercus rotundifolia*). Concentraciones en zonas localizadas superaron los umbrales de toxicidad para el ganado.
- La rana perezzi en su estado larvario es un gran acumulador de metales, pero no soporta aguas fuertemente acidificadas. Como consecuencia de esto, la población de rana común ha disminuido pero no ha desaparecido, ya que en los tramos más alejados al vertido ha sobrevivido sin problemas.
- El vertido ocasionó la desaparición total de la ictiofauna de la zona. En Julio de 2002, existen poblaciones de Barbo, Perca, Carpa, Gambusia y otras, pero lejos de la biodiversidad y densidad piscícola de antes del vertido. El proceso colonizador está siendo lento y hay una elevada presencia de metales en los tejidos de los peces.
- La afección a las aves ha sido mínima, detectándose tan sólo algunos efectos subletales en crías de algunas especies (*Ciconia Ciconia*).
- La afección no es significativa en los mamíferos del Parque Nacional de Doñana.
- Las Nutrias que están recolonizando el Guadiamar están bioacumulando metales como Pb y Zn.

- Las poblaciones bacterianas se han recuperado prácticamente de manera total.
- Las tareas de restauración del suelo han conseguido recuperar las características físicoquímicas de los mismos en la práctica totalidad de la zona afectada a excepción del tramo más alto.
- La biorremediación de suelos con *Thiobacillus ferrooxidans* y *Acidiphilium*, ha resultado exitosa a escala de laboratorio.
- La adecuación del suelo para el cultivo y la plantación de determinadas especies vegetales ha dado resultados muy positivos. La fitorremediación es adecuada para la eliminación de metales en los suelos (*Brassica spp*, *Amaranthus blitoides* y *Chamaemelum fuscatum*).

**Línea de investigación nº2:**

- La mejora de la conectividad del Corredor Verde del Guadiamar depende de la restauración del paisaje en la zona. La ampliación y mejora de las zonas arboladas es fundamental.

**Línea de investigación nº3:**

- No se aprecian diferencias significativas en el estado de conservación y biodiversidad de los hongos superiores de la zona afectada respecto del resto de Andalucía.
- La elevada biodiversidad de la cuenca del Guadiamar debe ser restaurada y protegida para su uso como Corredor Verde.
- La nematofauna ha visto incrementada su presencia en las áreas afectadas.
- En general, las poblaciones de hormigas son hoy en día de menor diversidad en las zonas más afectadas por el vertido que en el resto de la región, presentándose especies oportunistas como *T. Nigerrimum* y *T. Hispanicum*, en perjuicio de especies endémicas.
- El número de especies de mariposas presentes en la zona de afección es todavía mucho menor al que existía con anterioridad.
- Las poblaciones de coleópteros en la zona afectada son en la actualidad muy escasas, comenzando ahora a apreciarse cierta tendencia a la recolonización.

- Los reptiles han visto disminuida su presencia en la zona y todavía no han recuperado la biodiversidad y densidad poblacional anteriores al vertido.
- Las aves no han visto alterada de forma sustancial su biodiversidad ni su densidad poblacional.
- La vegetación no ha experimentado una mayor incidencia de plagas (Procesionaria, minador y otras).
- La zona de Corredor Verde se encuentra empobrecida respecto de especies de mesomamíferos. No obstante, en el entorno del Guadiamar, la presencia de estos mamíferos es superior a la esperada lo que indica un potencial regenerador importante.

**Línea de investigación nº4:**

- Los asentamientos humanos y la organización funcional de los mismos son heterogéneas y en general débiles. Puede mejorarse sustancialmente el tejido económico-social de la zona con actuaciones de tipo organizativo.
- Los usos agrícolas, que son mayoritarios en la zona del Corredor Verde, deben ser correctamente integrados en él.
- El patrimonio monumental de la cuenca del Guadiamar está insuficientemente mantenido y catalogado. Deberían realizarse acciones en aras a la integración de los restos histórico-artísticos en el programa de recuperación de la zona.
- La geografía humana está siendo estudiada en el contexto de esta línea de investigación.
- Se han realizado acciones para la integración participativa de los pobladores de la zona en la regeneración de la misma, atendándose sus demandas y preocupaciones como un apartado más a satisfacer dentro de la instauración del Corredor Verde.
- Se están considerando los factores económico y laboral de las poblaciones locales para integrarlos de manera sostenible en el proyecto de Corredor Verde.
- Se han detectado diferencias notables entre las concentraciones de distintos metales en sangre de personas pertenecientes al entorno afectado y personas de otras zonas de Andalucía.

De todo ello se concluye que:

1. El vertido tóxico generó un impacto ambiental, económico y social muy elevado en la zona, viéndose afectados principalmente el suelo de la llanura aluvial, la calidad de las aguas superficiales, la fauna y flora del entorno y los habitantes de la zona.
2. Desde la fecha del vertido hasta ahora, un elevado número de bioindicadores ha sido utilizado para valorar la evolución de la recuperación ambiental de la zona que, pese a que se reconoce que ha mejorado, se encuentra lejos de su óptimo.
3. Las actuaciones que se están llevando a cabo pretenden englobar todos los aspectos y atender a todas las necesidades, con el fin de recuperar la zona no sólo ambientalmente sino también desde los puntos de vista social, económico y cultural.





Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño



**TECAR**

