

# 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 n°1
- 23. Resultados para objetivo n°2
- 24. Resultados para objetivo n°3
- 25. Resultados para objetivo n°4
- 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.