

**Maestría en Ingeniería Civil**

**Equipo Prototipo Evaporador – Condensador  
Para Potabilización De Agua**

**Humberto Enrique Silvera Pinzón**

**Bogotá, D.C., 15 de mayo de 2021**



**Equipo Prototipo Evaporador – Condensador  
Para Potabilización De Agua**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente**

**Germán Ricardo Santos Granados**  
**Director**

**Bogotá, D.C., 15 de mayo de 2021**



La tesis de maestría titulada “Equipo prototipo evaporador – condensador para potabilización de agua”, presentada por Humberto Enrique Silvera Pinzón, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la tesis

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Bogotá, D.C., 15 de mayo de 2021

## Agradecimientos

A mi madre MARÍA ZENaida que me impulsó a seguir creciendo profesionalmente y a mi padre HUMBERTO por su apoyo incondicional en todo el proceso de construcción de conocimiento que me ha llevado hasta este punto.

A mi hija AMMY VALERÍA que soportó estoicamente la reducción en la cantidad de tiempo que departimos juntos en favor del desarrollo del presente proyecto.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería, en especial a los Ingenieros GERMÁN RICARDO SANTOS y HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ por su generosidad en compartir sus conocimientos y motivarme a desarrollar la presente idea.



## RESUMEN

Se pretende desarrollar un sistema potabilizador de agua de mar mediante los procesos de evaporación y condensación que resulte mucho más eficiente y financieramente más rentable que el sistema tradicional de calderas.

Bajo este supuesto, el proyecto centra su línea de investigación y aplicación práctica en la profundización y utilización de los conceptos de evaporación, presión de vapor, propiedades del agua, temperatura, tensión superficial, condensación, presión, energía, entropía y otros, a fin de obtener un equipo que utilice como materia prima el agua de mar.

La idea es ofrecer una alternativa innovadora que satisfaga la demanda de agua potable en las regiones costeras e insulares, reduciendo los costos de operación y produciendo un bajo impacto ambiental.

Bajo la premisa de que el ciclo hidrológico es el proceso biogeoquímico de circulación del agua entre los distintos compartimientos de la hidrósfera, a veces cambiando de estado físico, el proyecto contempla la elaboración de un modelo físico – matemático a escala reducida, esto es, construir un equipo prototipo para desalinización de agua, que replique los diferentes estadios del ciclo hidrológico, pero en un ambiente totalmente controlado que permitan obtener agua de buena calidad apta para el consumo humano.

El proceso inicia con la fase de diseño y para el ensamble del equipo EVAPORADOR – CONDENSADOR, se construyeron los componentes que corresponden a las siguientes operaciones unitarias: CONDENSADOR, TÚNEL DE VIENTO, DOSIFICADOR DE AGUA CRUDA, EVAPORADOR, COMPRESOR y RECOLECCIÓN DE AGUA TRATADA.

Construido el sistema, se puso a trabajar el equipo, registrando detalladamente las variables involucradas, su incidencia en el proceso y los resultados finales obtenidos que permitieron medir la eficiencia del sistema. Finalmente se ajustaron los parámetros que controlan las variables involucradas -densidad y temperatura del agua, densidad y temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa- a fin de lograr su optimización para luego determinar los requerimientos de energía, así como sus costos de operación.

Las limitaciones de orden económico restringieron el acceso a tecnologías de punta. Sin embargo, este nuevo enfoque en la desalinización de agua de mar que permite en un ambiente controlado, eliminar la aleatoriedad de los resultados, potenciar los fenómenos de evaporación y condensación y mejorar los resultados, intenta abordar un procedimiento alternativo que aumente la eficiencia de producción de agua potable reduciendo los costos de operación con vista a lograr un sistema competitivo en el mercado.

Como evaluación se estableció una comparación entre los resultados reales obtenidos por el equipo Condensador – Evaporador y los valores calculados mediante las fórmulas teóricas y empíricas de evaporación conocidas, lo que nos permitió determinar la eficiencia observada.

## ÍNDICE GENERAL

|   |    |
|---|----|
| Introducción .....  | 32 |
| Tema de investigación .....                                 | 32 |
| Razón de ser de la investigación.....                       | 32 |
| Enfoque de la investigación .....                           | 33 |
| Propósito de la investigación.....                          | 33 |
| Supuestos.....  | 34 |
| Diagnóstico general del problema .....                      | 36 |
| Climas extremos .....                                       | 36 |
| Cambios climáticos observados .....                         | 38 |
| Razón de ser del proyecto .....                             | 44 |
| Aproximación a los capítulos de la tesis.....               | 47 |
| Limitaciones.....   | 50 |
| Alcances .....  | 50 |
| Errores.....  | 51 |
| Aciertos de carácter metodológico, teórico o técnico.....   | 51 |
| Metodología .....   | 52 |
| Capítulo 1 – Objetivos.....                                 | 54 |
| 1.1. Objetivo general .....                                 | 54 |
| 1.2. Objetivos específicos.....                             | 55 |
| 1.2.1. Construcción del equipo prototipo .....              | 55 |
| 1.2.2. Experimentación y validación de las ecuaciones ..... | 55 |
| 1.2.3. Optimización de los procesos.....                    | 56 |
| 1.2.4. Determinar los requerimientos de energía .....       | 56 |
| 1.2.5. Determinar los costos de operación .....             | 56 |
| Capítulo 2 – Estado del arte.....                           | 57 |
| 2.1. Compresión térmica de vapor (TCV) .....                | 58 |
| 2.2. Destilación por múltiple efecto (MED).....             | 58 |
| 2.3. Destilación súbita (MSF) .....                         | 59 |
| 2.4. Destilación solar.....                                 | 59 |
| 2.5. Destilación con membranas .....                        | 61 |
| 2.6. Destilación por congelación.....                       | 62 |
| 2.7. Formación de hidratos.....                             | 63 |

|   |     |
|---|-----|
| 2.8. Compresión mecánica de vapor (TCV).....                                  | 63  |
| 2.9. Ósmosis inversa.....   | 64  |
| 2.10. Electrodialisis .....   | 66  |
| 2.11. Intercambio iónico .....  | 67  |
| Capítulo 3 – Construcción del equipo prototipo .....                          | 68  |
| 3.1. Conceptos básicos.....   | 68  |
| 3.1.1. Propiedades físico - químicas del agua .....                           | 68  |
| 3.1.2. Propiedades del agua marina.....                                       | 70  |
| 3.1.3. Fenómeno de evaporación.....   | 71  |
| 3.1.4. Proceso de evaporación a temperatura ambiente .....                    | 72  |
| 3.1.4.1. Proceso de suministro de calor.....                                  | 78  |
| 3.1.4.2. Proceso de generación de viento .....                                | 78  |
| 3.1.4.3. Control de la capa de agua a evaporar.....                           | 79  |
| 3.1.5. Proceso de condensación de agua y recolección de agua condensada ..... | 79  |
| 3.1.6. Integración de los procesos de evaporación y condensación .....        | 83  |
| 3.1.6.1. Gas refrigerante .....   | 84  |
| 3.1.6.2. Clasificación de los gases refrigerantes.....                        | 84  |
| 3.1.6.3. Selección del gas refrigerante .....                                 | 88  |
| 3.1.6.4. Ficha técnica del gas refrigerante r410a .....                       | 90  |
| 3.1.6.4.1. Características y aplicaciones .....                               | 90  |
| 3.1.6.4.2. Toxicidad y almacenamiento .....                                   | 90  |
| 3.1.6.4.3. Componentes .....  | 90  |
| 3.1.6.4.4. Propiedades físicas .....  | 91  |
| 3.1.6.4.5. Gráfica comparativa temperatura/presión R-22- R-410A .....         | 92  |
| 3.1.6.4.6. Tabla de presión/temperatura .....                                 | 93  |
| 3.1.6.4.7. Diagrama de Mollier .....  | 94  |
| Diseño y construcción del equipo .....  | 95  |
| Evaporador – Condensador .....  | 95  |
| 3.2. Unidad condensadora .....  | 97  |
| 3.2.1. Tipos de Intercambiadores de calor.....                                | 97  |
| 3.2.2. Selección del tipo de intercambiador de calor.....                     | 104 |
| 3.2.3. Función de la unidad condensadora.....                                 | 114 |
| 3.2.4. Componentes de la unidad condensadora .....                            | 115 |
| 3.2.4.1. Serpentín.....   | 115 |
| 3.2.4.2. Ventilador .....   | 117 |
| 3.2.4.2.1. Ventilador axial.....  | 118 |
| 3.2.4.2.2. Ventilador centrífugo.....   | 119 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.3. Túnel de viento.....                                     | 120 |
| 3.3.1. Función del túnel de viento.....                       | 121 |
| 3.3.2. Modelación del túnel de viento .....                   | 123 |
| 3.3.3. Cálculo de capacidad del túnel de viento.....          | 128 |
| 3.4. Equipo dosificador de agua cruda .....                   | 130 |
| 3.4.1. Función del equipo dosificador de agua cruda.....      | 131 |
| 3.4.2. Componentes del equipo dosificador de agua cruda ..... | 132 |
| 3.4.2.1. Tanque de igualación .....                           | 132 |
| 3.4.2.2. Bombeo inicial .....                                 | 134 |
| 3.4.2.3. Dosificador de agua a superficie absorbente .....    | 135 |
| 3.4.2.4. Banda absorbente .....                               | 137 |
| 3.4.2.5. Sistema de recirculación de agua no procesada .....  | 141 |
| 3.5. Unidad evaporadora.....                                  | 143 |
| 3.5.1. Selección del tipo de intercambiador de calor.....     | 143 |
| 3.5.1. Función de la unidad evaporadora .....                 | 158 |
| 3.5.2. Componentes de la unidad evaporadora .....             | 159 |
| 3.5.2.1. Serpentín.....                                       | 159 |
| 3.5.2.2. Dispositivo de control .....                         | 160 |
| 3.6. Módulo de compresión .....                               | 162 |
| 3.7. Recolección de agua tratada.....                         | 167 |
| 3.8. Instrumentación para el control de la operación .....    | 169 |
| 3.8.1. Manómetro control línea de alta presión.....           | 169 |
| 3.8.2. Manómetro control línea de baja presión.....           | 170 |
| 3.8.3. Termómetros equipos condensador y evaporador.....      | 171 |
| 3.8.4. Higrómetro túnel de viento.....                        | 172 |
| 3.8.5. Hidrómetro tanque de igualación .....                  | 173 |
| Capítulo 4 – Experimentación y ecuaciones.....                | 175 |
| 4.1. Operación del sistema.....                               | 175 |
| 4.1.1. Resultados de la primera prueba de operación .....     | 175 |
| 4.1.2. Resultados de la segunda prueba de operación .....     | 180 |
| 4.1.3. Calidad del agua tratada .....                         | 186 |
| 4.1.3. Medición de la evaporación .....                       | 188 |
| 4.1.4. Fórmulas de evaporación .....                          | 189 |
| 4.1.4.1. Método aerodinámico .....                            | 189 |
| 4.1.4.2. Método del balance de energía .....                  | 192 |
| Capítulo 5 – Costos de operación del sistema .....            | 197 |
| 5.1. Demanda nominal de energía eléctrica .....               | 197 |

|  |     |
|--|-----|
| 5.2. Demanda real de energía eléctrica.....              | 198 |
| 5.3. Costos de la energía eléctrica .....                | 199 |
| 5.4. Costos unitarios de producción de agua tratada..... | 200 |
| Capítulo 6 – Optimización de los procesos .....          | 204 |
| Conclusiones .....                                       | 205 |
| Bibliografía.....  | 210 |
| Apéndice A .....   | 217 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 1. Evolución del cambio climático en Colombia .....                           | 41  |
| Tabla 2. Efectos esperados del cambio climático en Colombia .....                   | 43  |
| Tabla 3. Componentes del equipo Evaporador – Condensador.....                       | 53  |
| Tabla 4 - Tecnologías utilizadas en la desalinización de agua.....                  | 58  |
| Tabla 5. Composición de solutos sólidos del agua de mar .....                       | 70  |
| Tabla 6. Densidad del agua de mar.....  | 71  |
| Tabla 7. Gases refrigerantes Orgánicos e Inorgánicos .....                          | 84  |
| Tabla 8. Clasificación de los gases Frigorígenos según su composición química.....  | 85  |
| Tabla 9. Clasificación de los gases refrigerantes según su presión de trabajo ..... | 85  |
| Tabla 10. Componentes del Gas Refrigerante R410A.....                               | 90  |
| Tabla 11. Propiedades físicas del Refrigerante R410A.....                           | 91  |
| Tabla 12. Tabla de presión/temperatura para Gas Refrigerante R410A. ....            | 93  |
| Tabla 13. Componentes generales del equipo .....                                    | 95  |
| Tabla 14. Componentes generales del equipo .....                                    | 96  |
| Tabla 15. Valores típicos de U.....   | 110 |
| Tabla 16. Componentes de la unidad condensadora.....                                | 114 |
| Tabla 17. Especificaciones técnicas del serpentín del condensador.....              | 116 |
| Tabla 18. Especificaciones técnicas del ventilador axial.....                       | 118 |
| Tabla 19. Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo .....                 | 119 |
| Tabla 20. Componentes del conjunto túnel de viento .....                            | 120 |
| Tabla 21. Despiece túnel de viento .....  | 121 |
| Tabla 22. Partes que intervienen en el funcionamiento del túnel de viento.....      | 122 |
| Tabla 23. Velocidades medidas en el túnel de viento .....                           | 128 |
| Tabla 24. Velocidad y capacidad de aire en el túnel de viento.....                  | 129 |
| Tabla 25. Componentes del equipo dosificador de agua cruda .....                    | 131 |
| Tabla 26. Especificaciones técnicas del tanque de igualación.....                   | 133 |
| Tabla 27. Especificaciones técnicas de la bomba sumergible .....                    | 134 |
| Tabla 28. Componentes de las boquillas dosificadoras de agua cruda.....             | 135 |
| Tabla 29. Especificaciones técnicas tubería dosificadora de agua cruda .....        | 136 |
| Tabla 30. Componentes del conjunto banda absorbente.....                            | 138 |
| Tabla 31. Especificaciones técnicas del conjunto banda absorbente.....              | 141 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 32. Componentes del sistema de recuperación de agua no procesada .....                               | 141 |
| Tabla 33. Especificaciones técnicas del sistema de recuperación de agua no procesada.....                  | 142 |
| Tabla 34. Componentes del conjunto unidad evaporadora.....   | 157 |
| Tabla 35. Especificaciones técnicas del serpentín del evaporador .....                                     | 160 |
| Tabla 36. Especificaciones técnicas del dispositivo de control de la unidad evaporadora .....              | 161 |
| Tabla 37. Componentes del módulo de compresión.....  | 163 |
| Tabla 38. Especificaciones técnicas del compresor.....   | 166 |
| Tabla 39. Componentes del conjunto recolección de agua tratada.....  | 168 |
| Tabla 40. Especificaciones técnicas de la canaleta de recolección de agua tratada.....                     | 168 |
| Tabla 41. Especificaciones técnicas del manómetro de alta presión .....                                    | 169 |
| Tabla 42. Especificaciones técnicas del manómetro de baja presión .....                                    | 170 |
| Tabla 43. Especificaciones técnicas de los termómetros digitales para el condensador y el evaporador ..... | 172 |
| Tabla 44. Especificaciones técnicas del higrómetro del túnel de viento.....                                | 173 |
| Tabla 45. Especificaciones técnicas del hidrómetro del tanque de igualación .....                          | 174 |
| Tabla 46. Parámetros iniciales de la primera operación del sistema.....                                    | 175 |
| Tabla 47. Ciclos de operación del sistema .....  | 176 |
| Tabla 48. Tiempos de operación del sistema discriminados por ciclos .....                                  | 176 |
| Tabla 49. Resultados de la primera operación del sistema.....  | 177 |
| Tabla 50. Parámetros iniciales de la segunda operación del equipo.....                                     | 180 |
| Tabla 51. Resultados de la segunda operación del sistema .....   | 181 |
| Tabla 52. Valores de altura de rugosidad en superficies naturales .....                                    | 190 |
| Tabla 53. Demanda nominal de energía de los aparatos eléctricos utilizados .....                           | 197 |
| Tabla 54. Demanda real de energía de los aparatos eléctricos utilizados .....                              | 198 |
| Tabla 55. Valores del kilovatio de energía para Colombia en mayo de 2021 .....                             | 199 |
| Tabla 56. Costos fijos de operación del sistema.....   | 200 |
| Tabla 57 - Costo unitarios de operación del sistema por litro de agua tratada.....                         | 201 |
| Tabla 58 - Costos totales de producción por litro de agua tratada .....                                    | 202 |
| Tabla 59. Presión atmosférica de las capitales de Colombia .....   | 217 |
| Tabla 60. Propiedades del vapor de agua saturado .....   | 218 |
| Tabla 61. Propiedades del aire seco a presión atmosférica.....   | 219 |
| Tabla 62. Densidad del agua entre 0° y 100°C.....  | 220 |



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 1. Operaciones unitarias del equipo evaporador - condensador .....  | 35  |
| Ilustración 2. Clasificación climática calculada a partir de los datos de temperatura y precipitación observadas para el período 1901-1925..... | 39  |
| Ilustración 3. Clasificación climática proyectada a partir de los datos de temperatura y precipitación estimada para el período 2076-2100.....  | 40  |
| Ilustración 4. Razón de ser del proyecto.....   | 44  |
| Ilustración 5. Diagrama de flujo del equipo Evaporador – Condensador.....   | 52  |
| Ilustración 6. Molécula de agua .....   | 68  |
| Ilustración 7. Densidad del agua a diferentes temperaturas .....  | 69  |
| Ilustración 8. Proceso de vaporización del agua.....  | 72  |
| Ilustración 9. Ciclo hidrológico abreviado .....  | 73  |
| Ilustración 10. Tendedero.....  | 75  |
| Ilustración 11. Corrientes de viento en la playa .....  | 76  |
| Ilustración 12. Proceso de evaporación del agua .....   | 77  |
| Ilustración 13. Redes atrapa nieblas instaladas en la ciudad de Lima .....  | 80  |
| Ilustración 14. Estructura General del Atrapa Niebla .....  | 81  |
| Ilustración 15. Atrapa niebla y canaleta de recolección .....   | 81  |
| Ilustración 16. Gráfica comparativa temperatura/presión R-22- R-410A. ....  | 92  |
| Ilustración 17. Diagrama de Mollier para Refrigerante R410A. ....   | 94  |
| Ilustración 18. Equipo Condensador – Evaporador. Vista izquierda .....  | 95  |
| Ilustración 19. Equipo Condensador – Evaporador. Vista derecha.....   | 96  |
| Ilustración 20. Intercambiador directo. Esquema de operación de una torre de refrigeración ....   | 97  |
| Ilustración 21. Intercambiador indirecto. Calentador regenerativo de aire Ljungstrom .....  | 98  |
| Ilustración 22. Intercambiador Indirecto de acople líquido. Sistema de refrigeración de un motor de combustión interna .....                    | 99  |
| Ilustración 23. Intercambiador indirecto de carcasa y tubo .....  | 100 |
| Ilustración 24. Intercambiador indirecto en espiral.....  | 101 |
| Ilustración 25. Intercambiador indirecto de placas.....   | 102 |
| Ilustración 26. Temperaturas de entrada y salida de los flujos en el Condensador.....   | 106 |
| Ilustración 27. Comportamiento de la temperatura de los flujos que actúan en el Condensador .....   | 106 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 28. Despiece y funcionamiento de la unidad Condensadora .....  | 113 |
| Ilustración 29. Serpentín del Condensador.....   | 115 |
| Ilustración 30. Ventilador axial y ventilador centrífugo del Condensador .....   | 117 |
| Ilustración 31. Funcionamiento del ventilador axial del Condensador.....   | 118 |
| Ilustración 32. Funcionamiento del ventilador centrífugo del Condensador .....   | 119 |
| Ilustración 33. Conjunto túnel de viento - Vista frontal .....   | 120 |
| Ilustración 34. Despiece túnel de viento .....   | 121 |
| Ilustración 35. Funcionamiento del túnel de viento .....   | 122 |
| Ilustración 36. Modelación del túnel de viento – Unidad condensadora desnuda .....   | 123 |
| Ilustración 37. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de ventiladores de la Unidad Condensadora - Vista posterior ..... | 124 |
| Ilustración 38. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de ventiladores de la Unidad Condensadora - Vista lateral.....    | 124 |
| Ilustración 39. Modelación del túnel de viento – Serpentín del condensador desnudo – Zona de la banda absorbente .....                                   | 125 |
| Ilustración 40. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de la banda absorbente, primer tramo.....                         | 125 |
| Ilustración 41. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de la banda absorbente, segundo tramo .....                       | 126 |
| Ilustración 42. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de la banda absorbente, tercer tramo.....                         | 126 |
| Ilustración 43 - Túnel de viento protegido por vinilo acrílico y barniz .....  | 127 |
| Ilustración 44. Equipo dosificador de agua cruda .....   | 130 |
| Ilustración 45. Tanque de igualación del conjunto dosificador de agua cruda.....   | 132 |
| Ilustración 46. Hidrómetro para medir salinidad del agua influente .....   | 133 |
| Ilustración 47. Bomba sumergible para bombeo inicial.....  | 134 |
| Ilustración 48. Boquillas dosificadoras de agua salada.....  | 135 |
| Ilustración 49. Banda absorbente .....   | 137 |
| Ilustración 50. Proceso de construcción del conjunto Banda absorbente – Cilindros giratorios y rodamientos de bolas en acero inoxidable.....             | 138 |
| Ilustración 51. Proceso de construcción del conjunto Banda absorbente – Chasis de la banda en acero inoxidable – Sistema de tracción tipo araña .....    | 139 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 52. Proceso de construcción del conjunto Banda absorbente – Sistema de transmisión de potencia mediante correa de caucho – Acople del motor tipo araña en plástico de alta densidad ..... | 139 |
| Ilustración 53. Conjunto Banda absorbente ensamblado – Motoreductor eléctrico – Banda absorbente tejida en poliéster y polycelulosa .....   | 140 |
| Ilustración 54. Sistema de recuperación de agua no procesada .....  | 142 |
| Ilustración 55. Presión y temperatura a la entrada del compresor .....  | 146 |
| Ilustración 56. Comportamiento del gas refrigerante dentro de la unidad evaporadora .....   | 147 |
| Ilustración 57. Zonas y líneas del diagrama Entálpico o Diagrama de Mollier.....  | 149 |
| Ilustración 58. Entalpía del Gas R410A de acuerdo con las condiciones de operación establecidas en el circuito de intercambio térmico .....   | 150 |
| Ilustración 59. Conjunto unidad evaporadora .....   | 158 |
| Ilustración 60. Serpentin del evaporador .....  | 159 |
| Ilustración 61. Dispositivo de control de la unidad evaporadora – Tubo capilar .....  | 161 |
| Ilustración 62. Función módulo de compresión.....   | 162 |
| Ilustración 63. Ciclo de operación del compresor .....  | 163 |
| Ilustración 64. Módulo de compresión .....  | 166 |
| Ilustración 65. Funcionamiento de la canaleta de agua tratada .....   | 167 |
| Ilustración 66. Canaleta de recolección de agua tratada .....   | 168 |
| Ilustración 67. Manómetro para línea de gas de alta presión.....  | 169 |
| Ilustración 68. Manómetro para línea de gas de baja presión.....  | 170 |
| Ilustración 69. Termómetros digitales para control de temperatura en la Unidad Condensadora y en la Unidad Evaporadora .....  | 171 |
| Ilustración 70. Higrómetro que mide la humedad relativa y la temperatura del túnel de viento  | 172 |
| Ilustración 71. Hidrómetro que registra la densidad relativa y la salinidad del agua de entrada al equipo.....  | 173 |
| Ilustración 72. Equipo prototipo Evaporador – Condensador totalmente ensamblado .....   | 174 |
| Ilustración 73. Temperatura del Condensador - Primer Impulso .....  | 179 |
| Ilustración 74. Temperatura del Condensador - Segundo Impulso .....   | 179 |
| Ilustración 75 - Presión a la salida del evaporador - Segunda prueba .....  | 182 |
| Ilustración 76 - Temperatura a la salida del compresor - Segunda prueba .....   | 183 |
| Ilustración 77 - Temperatura del aire en la unidad condensadora - Segunda prueba .....  | 184 |
| Ilustración 78 - Temperatura del aire en la unidad evaporadora - Segunda prueba.....  | 185 |
| Ilustración 79 - Salinidad del agua a tratar.....   | 187 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 80 - Salinidad del agua tratada.....   | 187 |
| Ilustración 81. Volumen de control para ecuaciones de continuidad y energía .....          | 192 |
| Ilustración 82 - Costos por litro de agua tratada Vs. tiempo de operación del equipo ..... | 203 |

# **Introducción**

## **Tema de investigación**

¿Es posible desarrollar un sistema potabilizador de agua mediante los procesos de evaporación y condensación (destilación) que resulte mucho más eficiente y financieramente más rentable que el sistema tradicional de calderas?

## **Razón de ser de la investigación**

El proyecto pretende contribuir a mejorar la calidad de vida de las comunidades asentadas en las regiones costeras e insulares del país que se han visto sensiblemente afectadas por los efectos del cambio climático. A ese respecto el objetivo se centra en disminuir la vulnerabilidad de estos territorios frente a los impactos negativos de los fenómenos climáticos, aumentando la capacidad de las comunidades de resistir los eventos extremos y recuperarse tras éstos.

De esta manera el proyecto se identifica plenamente con el perfil del graduado de la Maestría en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente que imparte la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, que entre sus apartes pretende lograr una “Formación científica y conceptual que les permita participar adecuadamente en las diversas fases de los proyectos, de todo tipo y magnitud, relacionados con la utilización

óptima de los recursos hidráulicos, en un contexto de desarrollo sostenible, es decir, en equilibrio con la conservación y el mejoramiento de las condiciones ambientales, teniendo en cuenta la realidad social y económica del país y del mundo, además, con criterio ético y sensibilidad social, de forma tal que las necesidades reales y las expectativas de la sociedad colombiana sean adecuadamente satisfechas”.

### **Enfoque de la investigación**

El proyecto centra su línea de investigación y aplicación práctica en la profundización y utilización de los conceptos básicos de evaporación, presión de vapor, propiedades del agua, temperatura, condensación, presión, energía, entropía y otros, a fin de obtener un equipo que utilice como materia prima parte del gran volumen de agua de mar disponible en las regiones costeras e insulares para producir agua potable a través de los procesos físicos mencionados, haciendo uso óptimo de la energía disponible y potencializando la utilización de energías renovables en busca de disminuir los costos de operación y así alinearlos estratégicamente con los conceptos básicos de desarrollo sostenible.

### **Propósito de la investigación**

Se pretende desarrollar una alternativa innovadora que aporte una solución real y definitiva a fin de satisfacer la demanda de agua potable en las regiones costeras e

insulares colombianas, potencializando el uso de energías limpias y renovables que permitan reducir los costos de operación en que incurren los sistemas tradicionales, produciendo un bajo impacto ambiental y mejorando el bienestar de las comunidades objetivo.

## **Supuestos**

El ciclo hidrológico o ciclo del agua es el proceso de circulación del agua entre los distintos compartimientos de la hidrósfera. Se trata de un ciclo biogeoquímico en el que hay una intervención de reacciones químicas, y el agua circula de unos lugares a otros o cambia de estado físico.

La mayor parte de la masa del agua se encuentra en forma líquida, sobre todo en los océanos y mares y en menor medida en forma de agua subterránea o de agua superficial como en los lagos, ríos y arroyos. El segundo compartimento por su importancia es el del agua acumulada como hielo sobre todo en los casquetes polares ártico y antártico, con una participación pequeña de los glaciares de montaña, sobre todo de las latitudes altas y medias, y de la banquisa.

Por último, una fracción menor está presente en la atmósfera como vapor o, en estado gaseoso, como nubes. Esta fracción atmosférica es sin embargo muy importante para el intercambio entre compartimentos y para la circulación horizontal del agua, de

manera que se asegura un suministro permanente a las regiones de la superficie continental alejadas de los depósitos principales (MINTIC MINEDUCACIÓN, 2014).

El proyecto contempla la elaboración de un modelo físico – matemático a escala reducida, que replique el circuito que esta fracción atmosférica del ciclo hidrológico genera, es decir, que replique los procesos unitarios de:



Ilustración 1. Operaciones unitarias del equipo evaporador - condensador

El proyecto requiere de esta manera para su desarrollo el estudio, profundización y aplicación de conocimientos de la hidráulica de fluidos, mecánica de fluidos, hidrología y termodinámica, además de requerir apoyo de otras ciencias como la ingeniería mecánica, eléctrica, electrónica y el diseño industrial.



## **Diagnóstico general del problema**

### **Climas extremos**

La forma e intensidad en que los elementos del clima (temperatura y precipitación) van cambiando de un año a otro, se ha acuñado como VARIABILIDAD CLIMÁTICA. Estudios realizados por el Proyecto de Adaptación al Cambio Climático a través de una efectiva gobernabilidad del agua en el Ecuador –PACC Ecuador- concluyen que estos cambios climáticos son mucho más notorios si se evalúan a escala local y regional que a nivel mundial. La variabilidad climática está cambiando la dinámica conocida de las inundaciones, generando impactos profundos en los arrecifes de coral, acidificando los océanos, afectando los ecosistemas de montaña, generando olas de calor y el retroceso de los glaciares:

**INUNDACIONES:** Una inundación se produce por la ocupación que una masa de agua hace de una zona que habitualmente está libre de ésta. Las causas más comunes están asociadas con las crecientes de los ríos y quebradas provocadas por las precipitaciones de gran intensidad, el ascenso del nivel del mar y otros fenómenos extremos como los tsunamis y huracanes.

En el caso de los ríos, quebradas y huracanes, las inundaciones generadas se pueden considerar como un fenómeno natural y casi predecible, al que las comunidades se han venido adaptando a lo largo del tiempo, e inclusive, algunas veces obteniendo

beneficios de los excesos de agua y de los sedimentos con nutrientes que la creciente arrastra.

Con todo, debido a que el rápido y constante aumento de la temperatura global ha producido grandes alteraciones en el sistema climático, el ciclo del agua también se ha alterado, dando paso a inundaciones más frecuentes y más recurrentes (CIIFEN, 2014).

**IMPACTO EN LOS ECOSISTEMAS DE MONTAÑAS:** El aumento general de la temperatura del planeta provoca que los suelos de montaña cambien su estructura particular, disminuyendo de esta manera su capacidad de recarga hídrica.

Por otra parte, los páramos han sido objeto de invasión e intervención progresiva por parte de los seres humanos, principalmente para utilizar sus suelos en actividades agrícolas, uso que está acelerando su proceso de degradación y sumando a la reducción de capacidad de recarga hídrica.

**OLAS DE CALOR:** El aumento de la temperatura global está generando la aparición de las denominadas olas de calor, que no es otra cosa que un periodo prolongado de tiempo con registro de temperaturas muy altas, que puede venir acompañado, en algunos casos, con el aumento excesivo de humedad (CIIFEN, 2014).

**RETROCESO DE GLACIARES:** Los glaciares se forman por acumulación de la nieve caída sucesivamente. Entonces, para la formación de un glaciar se necesita que la masa de nieve que caiga en un período de tiempo y en volumen de control, sea mayor que la masa de nieve descongelada por efecto climático en ese mismo periodo de tiempo y volumen de control. Aunque el descongelamiento o reducción de los glaciares en el mundo no está bien documentado, falta tan solo un buen ojo observador para darse cuenta de que los mismos vienen en franco retroceso por efectos del sostenido aumento de la temperatura global. Este fenómeno disminuye directamente la disponibilidad de agua dulce para el consumo humano (CIIFEN, 2014).

### **Cambios climáticos observados**

Una vez establecidas las clasificaciones climáticas por el método de Vladimir Köppen y a partir de las mediciones de temperatura y precipitación registradas en estaciones hidrométricas ubicadas a lo largo y ancho del planeta durante el período de tiempo comprendido entre el año 1951 y el año 2000, cuyos conjuntos de datos fueron recopilados por la Unidad de Investigación Climática (CRU) de la Universidad de East Anglia y los datos de precipitación fueron aportados por el Centro Mundial de Climatología (GPCC) del Servicio Meteorológico Alemán, se generó el siguiente mapa digital de resultados (MAPAS DEL MUNDO DE KÖPPEN-GEIGER CLASIFICACIÓN DEL CLIMA, Institute for Veterinary Public Health – vetmeduni, vienna, 2014):

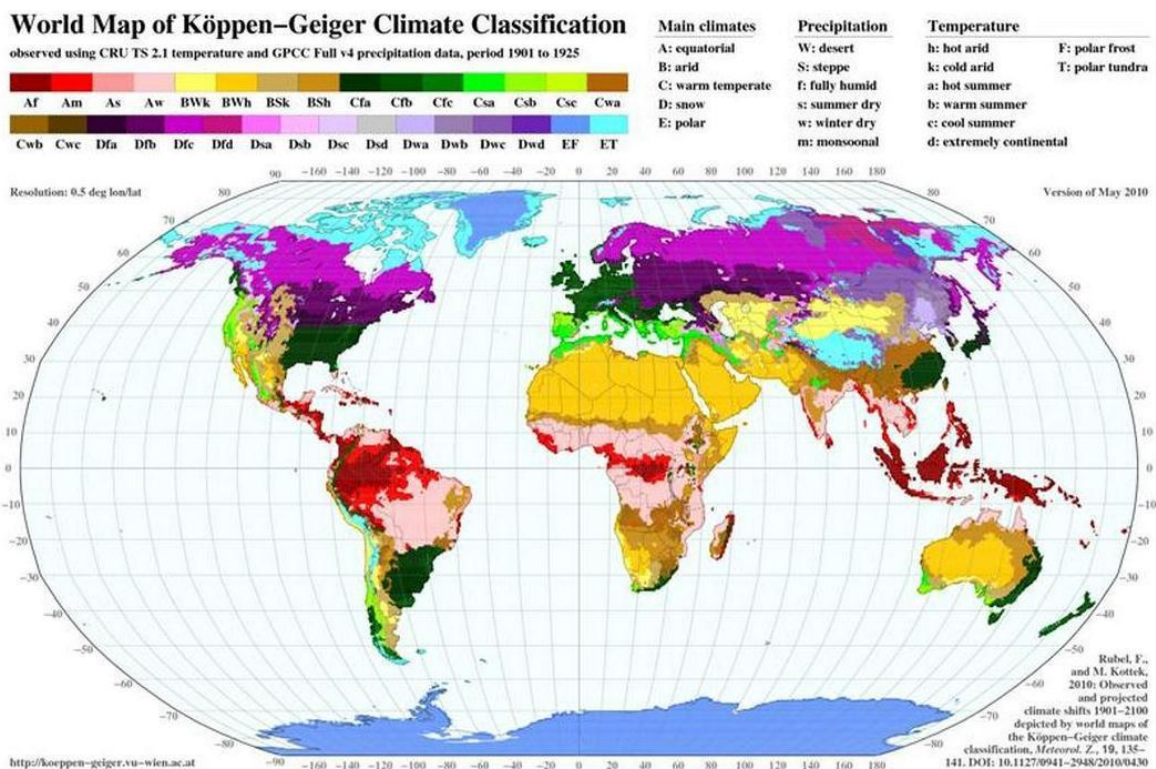


Ilustración 2. Clasificación climática calculada a partir de los datos de temperatura y precipitación observadas para el período 1901-1925

Al detectar el problema del cambio climático mundial, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), crearon el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en 1988. Se trata de un grupo abierto a todos los miembros de la Naciones Unidas y de la OMM (IPCC, Intergovernmental panel on climate change, 2014).

La función del IPCC consiste en analizar de forma exhaustiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las

actividades humanas, sus posibles repercusiones y las posibilidades de adaptación y atenuación de este.

Considerando diferentes escenarios del IPCC y realizando modelaciones matemáticas, se logran los siguientes resultados que recrean principalmente una estimación de los cambios climáticos en diferentes zonas del planeta en el siglo 21. Los mayores cambios se presentan en el clima ecuatorial (A), el clima árido (B), el clima templado cálido (C), el clima de la nieve (D) y el clima polar (E). En términos globales se estiman cambios de: 2.6 a 3.4% (E a D), 2.2 a 4.7% (D a C), 1,3-2,0% (C a B) y 2.1 a 3.2% (de C a A).

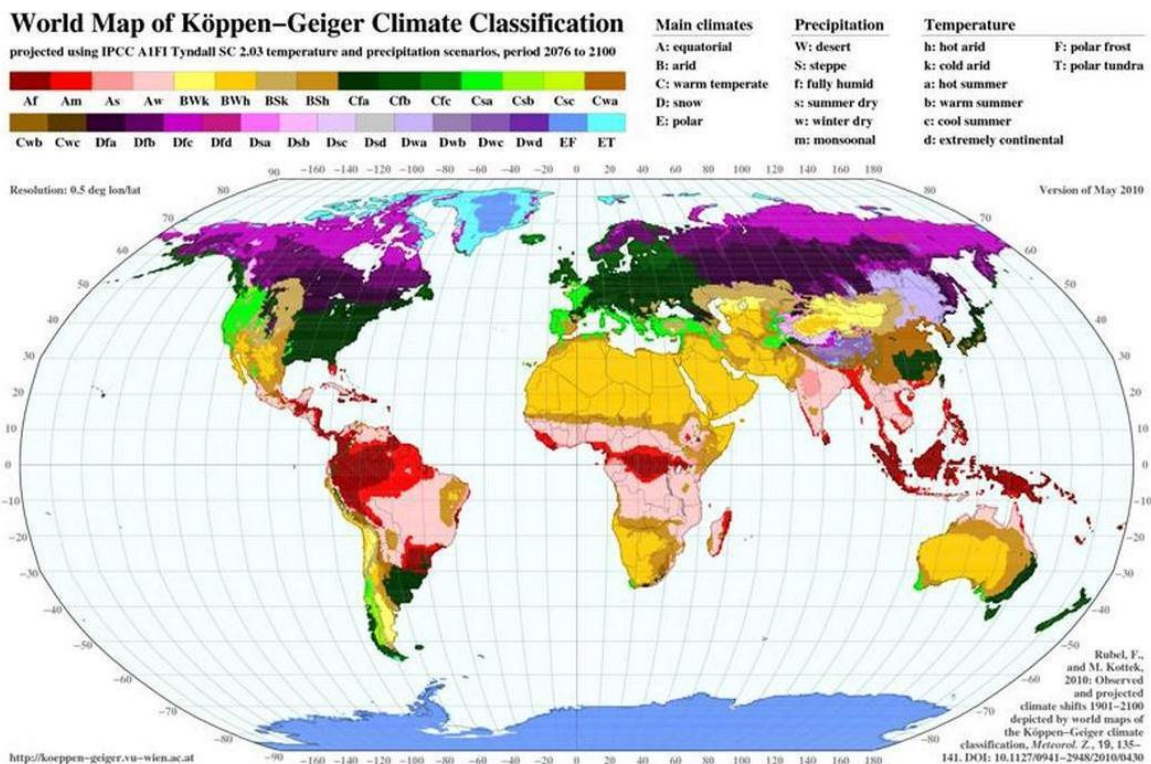
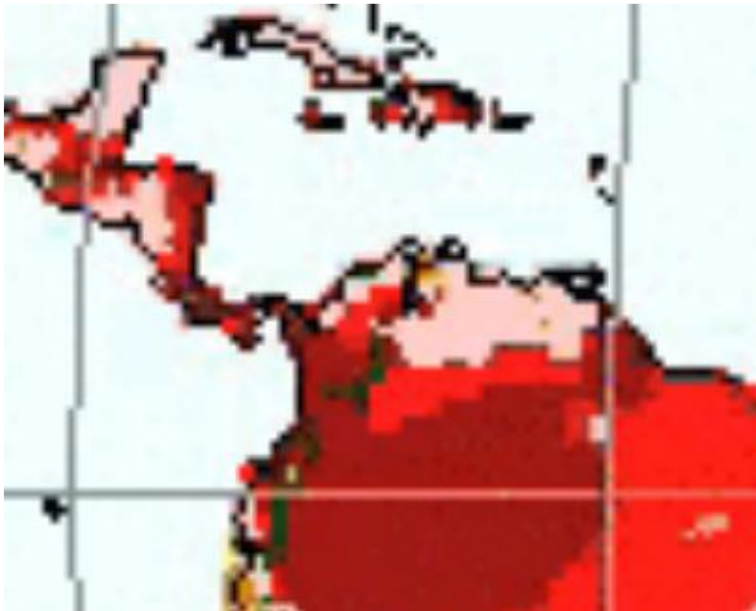


Ilustración 3. Clasificación climática proyectada a partir de los datos de temperatura y precipitación estimada para el período 2076-2100



Al comparar los resultados de las dos imágenes, se aprecia la siguiente evolución para Colombia:





En la Zona Andina y la Costa Pacífica, aumentarán las zonas Af y Am.

En la Costa Atlántica aumentarán las zonas As y Aw.

Aw.

El significado de esta evolución climática de acuerdo con la clasificación climática de Köppen es el siguiente:

Tabla 1. Evolución del cambio climático en Colombia

| Clima | Color   | Denominación                     | Características  |
|-------|---|----------------------------------|--|
| Af    |  | Clima de selva tropical lluviosa | Precipitación mayor a 600 mm en el mes más seco.<br>Clima húmedo. Lluvioso todo el año, sin estación seca. |
| Am    |  | Clima monzónico                  | Precipitación menor a 600 mm en el mes más seco.   |
| As    |  | Clima de sabana tropical         | Al menos un mes con precipitación menor a 600 mm.<br>Estación seca en verano.                              |
| Aw    |  | Clima de sabana tropical         | Al menos un mes con precipitación menor a 600 mm.<br>Estación seca en invierno                             |

## **CAMBIO CLIMÁTICO EN COLOMBIA**

**VULNERABILIDAD:** La mayor parte de la población colombiana se encuentra en las partes altas de las cordilleras, donde se prevén problemas de escasez hídrica e inestabilidad de suelos, y en las costas, donde el aumento del nivel del mar y las inundaciones pueden afectar los asentamientos humanos y las actividades económicas clave. El país tiene, además, una alta recurrencia de eventos extremos, con una gran y creciente incidencia de emergencias asociadas al clima (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, El cambio climático en Colombia – Revisión de riesgos y oportunidades asociados al cambio climático, 2014).

**IMPACTOS ESPERADOS:** Los escenarios utilizados en el marco de la Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático de Colombia muestra tendencias a un aumento de la temperatura media, de entre 2 y 4 °C al año 2070 y una modificación de las condiciones hidrológicas, con reducción de las precipitaciones en algunas regiones de hasta un 30% (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, El cambio climático en Colombia – Revisión de riesgos y oportunidades asociados al cambio climático, 2014, pág. 1). Se espera, además, un impacto del cambio climático sobre los medios de vida de la población, en especial de la rural, y sobre la calidad de vida de todos los colombianos. Por otra parte, el cambio climático puede acelerar los procesos de desplazamiento y migraciones internos. En este orden de ideas, se va a generar un estrés adicional en la lucha contra la pobreza en el país, que intensificará –en algunos casos- la vulnerabilidad de poblaciones y grupos marginales y excluidos.

Tabla 2. Efectos esperados del cambio climático en Colombia

| COMPONENTE                       | EFECTO ESPERADO  |
|----------------------------------|--|
| <b>SALUD</b>                     | Aumento de la incidencia de las enfermedades transmitidas por vectores (malaria y dengue). Las regiones andinas son las más propensas a estas nuevas epidemias por ser zonas de malaria inestable, pero también indirectamente a causa del deterioro de los recursos hídricos y de las condiciones de habitabilidad.   |
| <b>SECTOR AGROPECUARIO</b>       | Gran parte de los agrosistemas del país son vulnerables a los efectos de la aridización, la erosión de los suelos, la desertificación y los cambios en el régimen hidrológico. También se estima un mayor riesgo de inundaciones en cultivos y de otros eventos naturales que afectan la producción agrícola (vendavales, granizadas, etc.).   |
| <b>RECURSOS HÍDRICOS</b>         | Se proyectan aumentos de escorrentía en las regiones costeras, en los llanos orientales y en los departamentos donde en las últimas décadas hubo inundaciones y deslizamientos. En contraste, se prevé una disminución de la escorrentía en la región andina y en el norte del país, que puede causar problemas en el suministro de agua y déficit en los embalses, lo cual disminuye la generación de hidroenergía. |
| <b>SISTEMAS COSTEROS</b>         | Con la elevación prevista del nivel del mar, millones de habitantes quedarían expuestos a las inundaciones en las zonas costeras, así como los asentamientos industriales, la infraestructura e instalaciones turísticas y los cultivos. También son vulnerables las fuentes de agua, por una mayor intrusión salina.  |
| <b>ECOSISTEMAS</b>               | Preocupa la reducción del área de nevados y páramos y, por tanto, de sus servicios ambientales. Los corales pueden sufrir por el aumento de la temperatura media del mar, y afectar así la biodiversidad y los recursos pesqueros asociados. Los impactos sobre los bosques pueden ser considerables, pero existe todavía incertidumbre sobre la resiliencia de estos.   |
| <b>VIVIENDAS Y ASENTAMIENTOS</b> | La infraestructura en todo el país y los asentamientos precarios y en zonas de riesgo pueden verse afectados por la mayor frecuencia de eventos extremos (en especial inundaciones, lluvias fuertes, tormentas tropicales, vendavales y deslizamientos), lo que deteriorará aún más las condiciones de habitabilidad y la calidad de vida de las poblaciones desplazadas y pobres.                                   |

Fuente: (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, El cambio climático en Colombia – Revisión de riesgos y oportunidades asociados al cambio climático, 2014)



## Razón de ser del proyecto

La razón de ser del proyecto se enmarca en una matriz que evalúa cual es la oportunidad que representa el problema a resolver, problema que está enfocado a suplir una necesidad y esta necesidad deberá satisfacerse cumpliendo una exigencia mínima de estándares de calidad.



Ilustración 4. Razón de ser del proyecto

### PROBLEMA

Los gases de efecto invernadero se acumulan en la atmósfera derivando en un calentamiento global, este calentamiento global genera cambios en el régimen de precipitaciones e incremento en los eventos de climas extremos, produciendo exceso de lluvia en unas zonas y sequías en otras. Los eventos de sequías que se presentan en las zonas costeras e insulares del país producen una sensible disminución de las fuentes de agua potable disponibles.

## **NECESIDAD**

La Asamblea General de las Naciones Unidas, en junio de 2010, reconoció explícitamente el derecho humano al agua y al saneamiento, reafirmando que un agua potable limpia y el saneamiento son esenciales para la realización de todos los derechos humanos. Colombia acogió la resolución de la ONU y la incorporó a la Constitución Política de Colombia, suscribiendo que será objetivo fundamental del Estado la solución de las necesidades insatisfechas de salud, de educación, de saneamiento ambiental y de agua potable. A partir de la constitución, es obligación del Estado garantizar a toda la población el acceso al agua potable.

## **OPORTUNIDAD**

Las regiones costeras e insulares han aumentado su densidad de población en razón al auge de la industria turística y el desarrollo de los puertos derivado de los tratados de libre comercio suscritos por Colombia con otros países. Al mismo tiempo, y por efectos del cambio climático, las fuentes de agua potable en estas regiones han venido en disminución de su número y caudal suministrado, razón por la cual hay un déficit de suministro de agua potable a la población, lo que significa una demanda para atender. Por otra parte, el agua de mar en estas mismas regiones se convierte en una fuente de agua virtualmente inagotable, la que, aprovechando la implementación de nuevas tecnologías, se puede procesar hasta convertirla en agua potable implementando un sistema de desalinización con bajos costos de producción mediante el uso de fuentes de energía renovables.

## **EXIGENCIA**

El agua producida por el sistema propuesto deberá cumplir con los requisitos de calidad de agua potable que exige la norma RAS 2000, promulgada mediante resolución No. 1096 del 17 de noviembre de 2000. El sistema implementado deberá utilizar fuentes de energía limpia, renovable y los costos de operación deben mantenerse bajos para garantizar una operación sostenible.

## **Aproximación a los capítulos de la tesis**

### **Capítulo 1**

El objetivo general del proyecto es proponer una solución técnica innovadora para potabilización de agua que utilice el agua de mar como materia prima del proceso. Las tecnologías implementadas pretenden mejorar la eficiencia de producción y reducir los costos de operación. De esta manera y mediante la entrega de agua potable, se intenta garantizar un nivel de vida digno a las poblaciones costeras e insulares.

Los objetivos específicos del proyecto tienen que ver con construir un equipo prototipo para desalinización de agua, que repliquen los diferentes estadios del ciclo hidrológico que se presentan en la naturaleza, pero en un ambiente totalmente controlado que permitan obtener agua de buena calidad apta para el consumo humano. Para este efecto se construirán equipos que cumplan con las operaciones de bombeo inicial, pulverización de agua salada en una banda absorbente, generación de corrientes de aire seco y caliente que evaporen la humedad presente en la banda absorbente, cristalización de la humedad arrastrada por las corrientes de aire caliente, fusión de los cristales de agua y finalmente recolección del agua producida.

## **Capítulo 2**

Se presenta una breve recopilación de los más destacados proyectos desarrollados a lo largo del planeta, enfocados en destilar agua a partir de agua de mar.

Se destacan los métodos que ya están bien definidos para atacar el problema en cuestión, así como, el tipo de energía del que hacen uso para su operación. En ese orden de ideas, se identifican métodos tan diversos que van desde la compresión térmica de vapor, hasta los diferentes tipos de destilación como son la destilación por múltiple efecto, la destilación súbita, la destilación solar, la destilación con membranas y la destilación por congelación. También se presentan métodos de cristalización, finalizando con los métodos de nano y micro filtración que utilizan el principio de ósmosis inversa, la electrodiálisis y las resinas de intercambio iónico.

## **Capítulo 3**

Para el ensamble del equipo EVAPORADOR – CONDENSADOR, se construyeron los componentes que corresponden a las siguientes operaciones unitarias: unidad condensadora, túnel de viento, equipo dosificador de agua cruda, unidad evaporadora, módulo de compresión, recolección de agua tratada. El capítulo 3 presenta una descripción clara y profusamente ilustrada del proceso de construcción de cada uno de los componentes, así como su función específica dentro del equipo.

## Capítulo 4

En este apartado y una vez construido el sistema, se ajustaron los parámetros de operación y se puso a trabajar el equipo, registrando detalladamente las variables involucradas y su incidencia en el proceso. Igualmente se registraron los resultados finales obtenidos del mismo.

Por ser pertinente y teniendo en cuenta que cada uno de los siguientes aspectos técnico-científicos involucrados en el proceso de evaporación y condensación del agua se encuentran profundamente ligados con él desarrollo del presente estudio e inciden de manera directa sobre los resultados medidos en la experimentación, se profundiza en este capítulo sobre los conceptos de: propiedades físico-químicas del agua, el proceso del fenómeno de evaporación de agua, las propiedades del agua marina y los métodos de medición de la evaporación.

Finalmente, los resultados obtenidos de la experimentación se compararon con los resultados entregados por las fórmulas teórico-prácticas conocidas para el fenómeno de evaporación, a fin de determinar el porcentaje de error medido.

## **Capítulo 5 y Capítulo 6**

Con el sistema totalmente funcional, se procedió a operarlo partiendo de diferentes parámetros iniciales, con el objeto de determinar su eficiencia y como acto seguido se compararon los resultados producidos con las fórmulas teóricas previamente establecidas para los procesos involucrados. Finalmente, resueltas estas inquietudes se ajustaron los parámetros de operación a fin de lograr la optimización en la operación del sistema y de esta manera se determinaron los requerimientos de energía, así como sus costos de operación.

### **Limitaciones**

En el desarrollo del proyecto se presentaron limitaciones de orden económico que restringieron en gran medida el acceso a tecnologías de punta con las cuales hubiera podido ser más fácil la obtención de los objetivos planteados, sin embargo, se considera que con los recursos invertidos se han logrado resultados prometedores en la consolidación de este nuevo enfoque en el proceso de potabilización de agua.

### **Alcances**

El proyecto pretende dar un nuevo enfoque al proceso de desalinización de agua de mar, abordando procedimientos alternativos a los ya conocidos para lograr el objetivo; se intenta con esto aumentar la eficiencia de producción de agua potable reduciendo al mismo tiempo los costos de operación con vista a lograr un sistema de desalinización que sea competitivo en el mercado de la potabilización de agua.

Una vez optimizado el proceso, y si los costos de operación lo justifican, se puede pensar en escalar el sistema para producción de agua potable a gran escala.

## **Errores**

En el capítulo 3 – **Experimentación y ecuaciones**, se estableció una comparación entre los resultados reales obtenidos por la operación del equipo CONDENSADOR – EVAPORADOR y los valores calculados mediante las fórmulas teóricas y empíricas conocidas, lo que nos permitió establecer un porcentaje de diferencia para cada uno de los procedimientos.

## **Aciertos de carácter metodológico, teórico o técnico**

El proyecto de construcción del equipo CONDENSADOR – EVAPORADOR tuvo como premisa priorizar la experimentación científica con el objeto de obtener resultados ciertos. Se planteó de esta manera porque la experimentación nos permite medir el comportamiento real del fenómeno de evaporación, ajustando y combinando las diferentes variables de entrada que influyen en su comportamiento (variables como: densidad del agua, temperatura del agua, densidad del aire, temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa).

Para llegar a la etapa de experimentación fue necesario primero pasar por la fase de diseño de las operaciones unitarias y la subsiguiente construcción del equipo CONDENSADOR – EVAPORADOR con el cual se pueden manipular las variables ya



comentadas. El equipo construido permite mediante la manipulación de las variables, y en un ambiente totalmente controlado, la optimización del proceso de evaporación de agua de mar, esto es, reducir tiempos y costos de operación.

Este enfoque es altamente beneficioso en razón a que nos permite controlar las variables que intervienen en el proceso, con lo cual se elimina la aleatoriedad de los resultados. Además, el control y manipulación de las variables nos permite optimizar los resultados. También el registro exacto a cerca de la manipulación de las variables nos permite determinar su efecto real sobre los resultados obtenidos.

**Metodología**

El prototipo del equipo a construir consta de las siguientes operaciones unitarias:

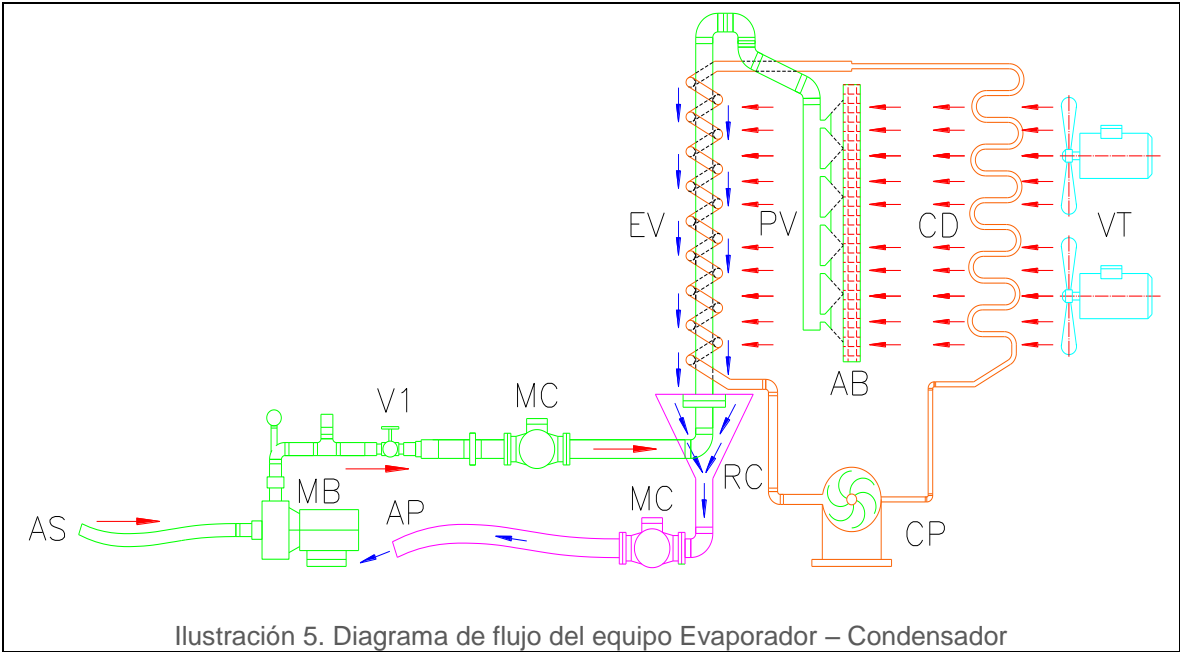


Tabla 3. Componentes del equipo Evaporador – Condensador

| No. | CODIGO | PROCESO                      | OBSERVACIONES  |
|-----|--------|------------------------------|--|
| 1   | AS     | AGUA SALADA                  | Agua cruda a ser tratada   |
| 2   | MB     | MOTOBOMBA                    | Bombeo inicial:<br>Succión desde fuente de suministro<br>Entrega caudal constante al sistema   |
| 3   | V1     | VÁLVULA CONTROL              | Regula las condiciones de caudal y presión a todo el sistema   |
| 4   | MC     | MEDIDOR CAUDAL               | Registra el volumen de líquido que ingresa al sistema y el volumen de líquido que sale del sistema   |
| 5   | CD     | CONDENSADOR                  | Sistema de tuberías que hace parte de un sistema de refrigeración y que radia calor al ambiente  |
| 6   | PV     | PULVERIZADOR                 | Sistema de boquillas de diseño especial que pulveriza el agua uniformemente sobre una superficie absorbente  |
| 7   | CP     | COMPRESOR                    | Equipo que hace parte del sistema de refrigeración e impulsa el gas que genera los diferenciales de temperatura  |
| 8   | VT     | VENTILADOR                   | Equipo que genera corrientes de aire dirigidas   |
| 9   | EV     | EVAPORADOR                   | Sistema de tuberías que hace parte de un sistema de refrigeración y que extrae calor del agua salada entrante al sistema   |
| 10  | AB     | RETENCIÓN DE MINERALES       | Superficie absorbente que retiene los minerales soportando el agua salada y permitiendo el paso del aire seco caliente que evapora el agua y transporta el vapor |
| 11  | RC     | RECOLECTOR DE AGUA DESTILADA | Canaleta dispuesta para la recolección del agua tratada  |
| 12  | AP     | AGUA POTABLE                 | Agua tratada para consumo humano   |

# Capítulo 1 – Objetivos

## 1.1. Objetivo general

En concordancia con la búsqueda de un modelo de desarrollo que tenga la capacidad de adaptarse a la realidad del cambio climático, y teniendo en cuenta –como ya se describió en los anteriores apartados- que el cambio climático produce en las comunidades costeras e insulares efectos tan delicados como el aumento de la incidencia de las enfermedades transmitidas por vectores, aridización, erosión y desertificación de los suelos, cambios en el régimen hidrológico y vulneración de las fuentes de agua por una mayor intrusión salina, se plantea como una solución técnica innovadora, la implementación de un sistema que se desempeñe en diferentes frentes a la vez, implementando un modelo de desarrollo sostenible y que cumpla con los siguientes presupuestos:

- ✚ Utilización de un recurso natural renovable –agua de mar-, como insumo o materia prima del proceso.
- ✚ Ayudar a proteger las fuentes hídricas de agua dulce disponibles, las cuales vienen en franco retroceso.
- ✚ Asegurar un nivel de vida digno a las poblaciones objetivo, entregando agua potable para el consumo humano.
- ✚ Implementar nuevas tecnologías que permitan optimizar los procesos, mejorar la eficiencia de producción y reducir los costos de operación para asegurar un proyecto sostenible.

## **1.2. Objetivos específicos**

### **1.2.1. Construcción del equipo prototipo**

Construir en pequeña escala un equipo prototipo para desalinizar agua de mar que incluya los procesos unitarios de:

- ✚ Bombeo inicial
- ✚ Medición de caudal de ingreso
- ✚ Pulverización de agua cruda sobre superficie absorbente
- ✚ Generación de corrientes de aire caliente y seco
- ✚ Evaporación de agua impregnada en la superficie absorbente
- ✚ Condensación del agua evaporada
- ✚ Medición de caudal de salida
- ✚ Disposición de minerales retenidos

### **1.2.2. Experimentación y validación de las ecuaciones**

Apoyado en el equipo prototipo construido, determinar las eficiencias de proceso de cada una de las operaciones unitarias implementadas para posteriormente compararlas con las fórmulas teóricas existentes y de esta manera determinar el error presentado entre las expresiones matemáticas conocidas y los experimentos prácticos realizados.

### **1.2.3. Optimización de los procesos**

Acudiendo a la experimentación, encontrar las condiciones óptimas de operación del equipo desalinizador con el objetivo de obtener la máxima eficiencia de destilación con el menor gasto energético posible.

### **1.2.4. Determinar los requerimientos de energía**

Analizar cuáles son los requerimientos de energía para la operación de cada uno de los procesos unitarios del equipo y la demanda total.

### **1.2.5. Determinar los costos de operación**

Conociendo la demanda total de energía del equipo, así como su producción real de agua potable determinar los costos unitarios de operación a fin de analizar y explorar la viabilidad de implementar el sistema a mayor escala con la capacidad de suplir el suministro de agua potable en pequeñas poblaciones.

## Capítulo 2 – Estado del arte

Basados en los principios de evaporación, condensación y precipitación, e imitando el ciclo natural del agua, se han desarrollado incontables proyectos de destilación de agua a partir de agua de mar. Según la Asociación Internacional de Desalinización (IDA, por sus siglas en inglés), hoy existen cerca de 18.000 plantas desalinizadoras en el mundo. Sin embargo, esas plantas sólo logran suplir entre el 1 y 3% de la demanda total de agua potable a nivel mundial debido al principal factor limitante que representa la gran cantidad de energía que requiere el proceso y en consecuencia su alto costo de operación. Así se explica en parte el porqué algunas de las más grandes plantas desalinizadoras se han desarrollado en países favorecidos con los suficientes recursos energéticos y económicos como Arabia Saudita (British Broadcasting Corporation, 2017).

En este punto, vale la pena mencionar que, en la actualidad existen dos métodos bien definidos para desalinizar agua, a saber:

- ✚ Métodos que provocan el cambio de fase del agua (vaporización y cristalización).
- ✚ Métodos que no provocan el cambio de fase del agua (filtración e intercambio iónico).

Su clasificación se puede establecer en función del tipo de energía que utilizan y del proceso empleado para lograr el objetivo. La siguiente tabla ilustra las diferentes tecnologías utilizadas:

Tabla 4 - Tecnologías utilizadas en la desalinización de agua

|                           | ENERGÍA        | PROCESO                  | TECNOLOGÍA                      |
|---------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------------|
| <b>CON CAMBIO DE FASE</b> | Térmica        | Evaporación              | Compresión térmica de vapor     |
|                           |                |                          | Destilación por múltiple efecto |
|                           |                |                          | Destilación súbita (flash)      |
|                           |                |                          | Destilación solar               |
|                           |                | Filtración y Evaporación | Destilación con membranas       |
|                           | Cristalización | Congelación              |                                 |
| Formación de hidratos     |                |                          |                                 |
| <b>SIN CAMBIO DE FASE</b> | Mecánica       | Evaporación              | Compresión mecánica de vapor    |
|                           |                | Filtración               | Ósmosis inversa                 |
| <b>SIN CAMBIO DE FASE</b> | Eléctrica      | Filtración selectiva     | Electrodialisis                 |
|                           | Química        | Intercambio              | Intercambio Iónico              |

Fuente: (Condorchem Envitech, 2019). Obtenido de: <https://blog.condorchem.com/https://blog.condorchem.com/desalacion-de-agua/#que-es>

## 2.1. Compresión térmica de vapor (TCV)

Utiliza evaporadores eléctricos al vacío que operan a una temperatura de 40°C. El evaporador al vacío transforma la fuente de agua en dos corrientes, una de concentrado y otra de agua de elevada calidad. Al trabajar en condiciones de vacío, se reduce el consumo energético debido a que la temperatura de ebullición del líquido se consigue a una temperatura inferior (Condorchem Envitech, 2019).

## 2.2. Destilación por múltiple efecto (MED)

En los procesos MED, el agua a tratar pasa a través de una serie de evaporadores puestos en serie. El proceso es igual al proceso de compresión térmica, pero usa una fuente

de energía distinta: El vapor de una de las celdas se usa para evaporar el agua de la siguiente mientras que el aporte de energía primaria se hace sobre la primera de las etapas. Los evaporadores al vacío por múltiple efecto son los más adecuados para el tratamiento de caudales elevados, sobre todo cuando se dispone de una fuente de calor de bajo coste (agua caliente, vapor, etc.) (Condorchem Envitech, 2019).

### **2.3. Destilación súbita (MSF)**

Cuando se calienta el agua a baja presión, se logra una evaporación súbita e irreversible. Este proceso se repite en etapas sucesivas en las que la presión disminuye según distintas condiciones. Se usa para desalar aguas cuya salinidad es elevada. También se recomienda para tratar aguas de temperaturas más altas y mayor grado de contaminación. Este tipo de plantas tienen como problema asociado, el alto consumo energético. Para atacar este problema se han diseñado instalaciones con doble propósito, donde se combina la producción de energía eléctrica a partir de granjas solares con la producción de agua potable usando plantas de evaporación tipo flash (Condorchem Envitech, 2019).

### **2.4. Destilación solar**

Como fuente de calor, la energía solar se ha empleado para destilar de dos formas bien definidas, una, tiene que ver con concentrar el calor para lograr altas temperaturas y la otra, es lograr la evaporación a temperaturas bajas. Estos principios de destilación solar se han aplicado a diferentes escalas; desde destiladores pequeños domésticos que



producen unos cuantos litros de agua al día, hasta grandes instalaciones con los que se obtienen varios metros cúbicos diarios.

Como ejemplo de uno de los grandes y exitosos equipos de destilación solar está la primera gran planta de destilación solar que se construyó por parte del inglés Charles Wilson en 1874 en el desierto de Atacama (Chile) para la Compañía Salitrera Lastenia Salinas. Con una capacidad de tratamiento de 22.500 litros de agua por día, funcionó hasta 1907. La superficie de captación tenía un área superior a los 4000 metros cuadrados (Sitio Solar, 2014).

Posteriormente se han desarrollado muchas otras grandes plantas de destilación solar en diversas zonas del mundo donde escasea el agua potable, pero con acceso al agua de mar. Países como Israel, Islas Canarias (España) y en diversas islas áridas del mediterráneo son tan solo algunos ejemplos. La destiladora solar de agua con mayor tamaño del mundo se encuentra en la isla de Patmos (Grecia), la cual cuenta con una superficie de captación de más de 8.000 metros cuadrados (Sitio Solar, 2014).

Entre los múltiples modelos y tamaños de destiladores solares se cuentan los destiladores solares de una vertiente, de dos vertientes, de tipo invernadero, de cascada, de tipo esférico de barredera y los multietapas y su rendimiento está en función de tres variables: la potencia de radiación del sol, la temperatura ambiente y la propia configuración del destilador. Pero en general, el aprovechamiento útil de la energía solar de los

destiladores de una sola etapa se estima entre el 25 y el 50%, lo que representa que, en días soleados es posible obtener entre 3 y 5 litros diarios por metro cuadrado de destilador (Sitio Solar, 2014).

## **2.5. Destilación con membranas**

Esta tecnología es relativamente nueva y se presenta como una solución para aquellas mezclas difíciles de separar y que la combinación de la diferencia de presiones de vapor y de diferente permeabilidad a través de una membrana semi-permeable hacen que la separación pueda ser efectiva y viable.

Consiste en un proceso térmico en el que solo las moléculas de vapor pueden pasar a través de la membrana, la cual es hidrofóbica. La fuerza que induce la separación es la misma presión de vapor y no la presión total como ocurre con la ósmosis inversa. Al aumentar la temperatura del agua, aumenta la presión de vapor y, por tanto, también aumenta el gradiente de la presión de vapor que es la fuerza impulsora.

De la misma manera como sucede en el caso de la evaporación, el proceso de destilación por membranas no está limitado por el equilibrio, razón por la cual se pueden conseguir los factores de recuperación del agua y de concentración del rechazo que se deseen, a diferencia de la ósmosis inversa, donde el equilibrio establece un límite en la separación (Condorchem Envitech, 2019).

## 2.6. Destilación por congelación

El método de desalinización por congelación es relativamente reciente y consiste en someter el agua salina a diversos procesos de refrigeración, para así obtener cristales de hielo puro. El proceso de congelación se lleva a cabo mediante dos procedimientos directos, a saber:

✚ **Congelación por expansión del agua:** También conocido como congelación en vacío y consiste en congelar parcialmente el agua de mar a una presión absoluta de 3mm de mercurio y a una temperatura de  $-4^{\circ}\text{C}$ . A esta presión se produce una evaporación que va acompañada del enfriamiento correspondiente y que es el responsable de la congelación. Se debe entonces mantener el vacío necesario, y para tal efecto se necesita retirar continuamente el vapor de agua formado mediante un proceso de aspiración, ya sea mediante la acción de un compresor mecánico, o en su defecto mediante absorción en una solución higroscópica. Para efectos prácticos, comprimir grandes volúmenes de vapor producido a baja presión genera muchas complicaciones (Desalinización del Agua, 2017).

✚ **Congelación con ayuda de un agente refrigerante:** Se utiliza para este procedimiento un refrigerante auxiliar que posea una tensión de vapor superior a la del agua y que además no se mezcle con el agua. Normalmente se usan gases para este efecto, como el butano. El agua de mar se congela parcialmente por la expansión del butano y además, se evitan los problemas

de compresión ya descritos en el proceso de congelación en vacío. Con el agente refrigerante, la desalinización es más eficiente que la destilación, en atención a que se requiere menos energía para congelar el agua que para evaporarla. Posee además la ventaja de que en el proceso no se producen depósitos minerales “incrustación” en los equipos y tuberías, como si ocurre a altas presiones y temperaturas (Desalinización del Agua, 2017).

## **2.7. Formación de hidratos**

Corresponde a otro método basado en el principio de la cristalización o congelación. Mediante la adición de hidrocarburos a la solución salina, se obtienen unos hidratos complejos en forma cristalina, con una relación molécula de hidrocarburo/molécula de agua del orden de 1/18. De la misma manera que el proceso de congelación, el rendimiento energético de este procedimiento es mayor que los de destilación, pero tiene una gran dificultad tecnológica para lograr la separación y el lavado de los cristales, lo que hasta el momento ha impedido su aplicación industrial. El proceso está en etapa de desarrollo (Moreno, 2019).

## **2.8. Compresión mecánica de vapor (TCV)**

Los evaporadores al vacío por compresión mecánica de vapor (CMV) evaporan el agua salada, en un lado de la superficie de intercambio, y se comprime lo suficiente para que condense en el otro lado y pueda así mantenerse el ciclo de destilación de agua, salvando las pérdidas del proceso y la elevación de la temperatura de ebullición del agua salada respecto a la pura. Diseñado para tratamiento de efluentes residuales industriales y

rechazos de plantas de tratamiento de aguas (salmueras) con un bajo coste energético. Su elevada eficiencia se debe al uso de un compresor de vapor, que aumenta el calor latente por la acción mecánica de compresión volumétrica con un pequeño consumo eléctrico del motor que acciona dicho compresor. El calor del vapor comprimido será cedido mediante un intercambiador de calor para calentar el efluente a evaporar y luego se induce la condensación del vapor para producir el agua destilada. Como el soplante rotativo o una bomba de vacío auxiliar producen el efecto de vacío, las temperaturas de ebullición y de vapor se reducen hasta los 60°C, reduciendo el consumo energético (Condorchem Envitech, 2019).

## **2.9. Ósmosis inversa**

La ósmosis es el paso de moléculas a través de una membrana parcialmente permeable, desde una región de menor concentración hacia otra de mayor concentración, en este proceso la membrana tiende a igualar las concentraciones en los dos lados. El paso de partículas solventes hacia la zona de menor potencial se conoce como presión osmótica y se mide en términos de presión atmosférica. Al utilizar una presión superior a la presión osmótica, se logra un efecto contrario a la ósmosis y se presiona el fluido a través de la membrana, logrando que sólo las moléculas de menor peso “agua” pasen desde el otro lado mientras que los sólidos disueltos quedan retenidos en la membrana, a esto se le llama ósmosis inversa (Carbotécnica, 2019).

La primera membrana de ósmosis inversa se construye en la Universidad de California en 1960, su composición era de acetato de celulosa. Este material impedía el

paso de las sales minerales y permitía el paso de un flujo de agua. Este tipo de membranas han venido en constante evolución y han logrado conseguir tanto mayor eficiencia energética como un menor costo de operación (Condorchem Envitech, 2019). Esta tecnología se emplea principalmente para la desalinización de aguas salobre y de agua de mar de acuerdo con los siguientes datos generales de operación:

- ✚ **Aguas Salobres:** Salinidad entre 2.000 mg/L y 10.000 mg/L. Se utilizan presiones entre 14 y 21 bar, obteniendo un rechazo mayor al 90 %. El agua obtenida posee concentraciones salinas menores a 500 mg/L, lo que la convierte en agua potable. Las plantas de tratamiento utilizan módulos de membranas enrolladas en espiral. Los costos de capital son del orden de 0.25 \$US/L de agua tratada/día, y los costos de operación son del mismo orden (Condorchem Envitech, 2019).

- ✚ **Agua de Mar:** Salinidad entre 30.000 mg/L – 40.000 mg/L. Se utilizan membranas de poliamida de tipo fibra hueca con presiones de trabajo entre 50 y 70 bar, obteniendo un rechazo superior al 99.3 %. Los costos de operación de este tipo de plantas se estiman entre 1 y 1.25\$US/ L de agua tratada/día, lo que lo vuelve no sea competitivo comercialmente frente a otros sistemas de evaporación multietapa, si las necesidades de agua superan los 40.000 metros cúbicos de agua tratada/día (Condorchem Envitech, 2019).

Más utilizada por aplicaciones de tipo industrial, la ósmosis inversa goza de una hegemonía clara por su eficacia.

## **2.10. Electrodialisis**

En la electrodialisis se elimina soluto indeseable de un electrolito mediante un proceso de separación electroquímica en el cual se utilizan membranas cargadas en conjunto con una diferencia de potencial eléctrico. En el proceso, el agua fluye entre las membranas catiónicas y aniónicas colocadas de manera alternada, formando una especie de batería o acumulador. La corriente continua es la que aporta energía para la migración de los iones disueltos a través de las membranas. Estos iones son eliminados o concentrados hacia los pasos de agua por medio de las membranas selectivas.

El proceso de electrodialisis se usa en muchos lugares del mundo para la desalación del agua salobre y para potabilizar agua. Una variante de este procedimiento, la electrodialisis inversa, ha desplazado a su predecesora la electrodialisis unidireccional, en el proceso de desalación del agua. El método de electrodialisis inversa aplica los mismos principios que la electrodialisis unidireccional; la diferencia radica en que los electrodos se intercambian tres o cuatro veces por hora, cambiando la dirección de la electricidad y, por tanto, los iones migran en sentido opuesto. De esta manera se logra disminuir las incrustaciones y los depósitos de residuos en el dispositivo (La Guía Química, 2010).

## **2.11. Intercambio iónico**

El intercambio iónico también es un proceso que separa sales y se basa en las propiedades que presentan ciertas sustancias sólidas insolubles que son capaces de intercambiar aniones o cationes cuando se ponen en contacto con un electrolito. Las resinas liberarán iones  $H^+$  y  $OH^-$  y fijarán los iones de electrolito. Las resinas normalmente necesitan regeneración con agentes químicos para sustituir los iones originales y los fijados en la resina, y terminan por agotarse. Su cambio implica un coste difícilmente asumible para aguas de mar y aguas salobres. Sólo es de aplicación en aguas poco concentradas y como tratamiento en procesos industriales (Moreno, 2019).

La desmineralización por intercambio iónico proporciona agua de gran calidad si la concentración de sal es menor de 1 gr/l. Por lo tanto, se utiliza para acondicionar agua para calderas a partir de vapores recogidos o acuíferos, o en procesos industriales con tratamiento de afino (Moreno, 2019).



## Capítulo 3 – Construcción del equipo prototipo

### 3.1. Conceptos básicos

#### 3.1.1. Propiedades físico - químicas del agua

En la molécula de agua, los dos átomos de hidrógeno se localizan en los vértices de un tetraedro centrado en el oxígeno y los dos pares de electrones sin compartir en los dos vértices restantes. Como el oxígeno es más electronegativo que el hidrógeno, los enlaces del agua están polarizados (Sancho, 2018). Esta polaridad en la molécula se expresa en términos de su momento dipolar y su valor es de  $6.1 \cdot 10^{-30}$  C m, que es de los más elevados (<http://aulavirtual.usal.es>, 2018). Consecuencia de esta fuerte polaridad se forman enlaces que se extienden tridimensionalmente en el espacio uniendo moléculas vecinas, mediante puentes de hidrógeno. En promedio, cada molécula de agua forma 4 puentes en el hielo y 3.6 en el agua.

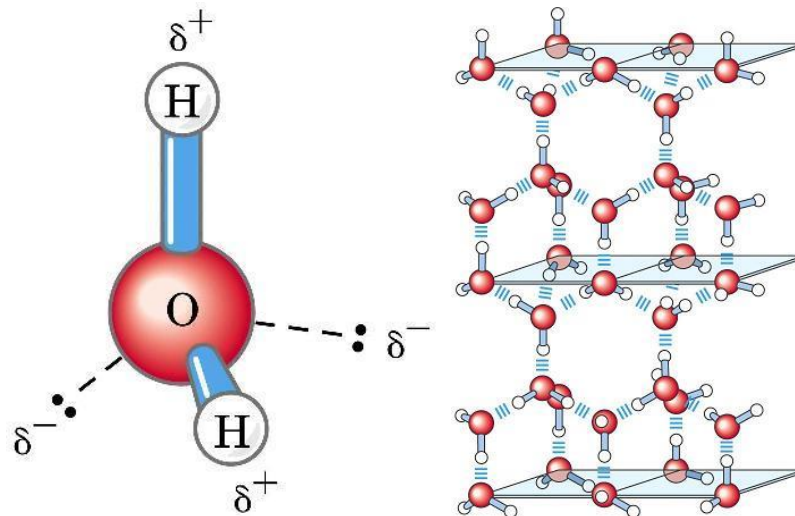


Ilustración 6. Molécula de agua

Fuente: (Sancho, 2018). Obtenido de <http://www.bifi.es>:  
<http://www.bifi.es/~sancho/estructuramacromoleculas/1aguaylasmembranasbiologicas/1aquaymembranasbiologicas.htm>

La densidad del agua presenta un comportamiento extraño en relación con su temperatura, pues va aumentando proporcionalmente con el aumento de temperatura hasta llegar a un máximo de 1.000 g/mL a una temperatura de 3.98°C, a partir de este punto, su densidad va disminuyendo gradualmente con el incremento de temperatura.

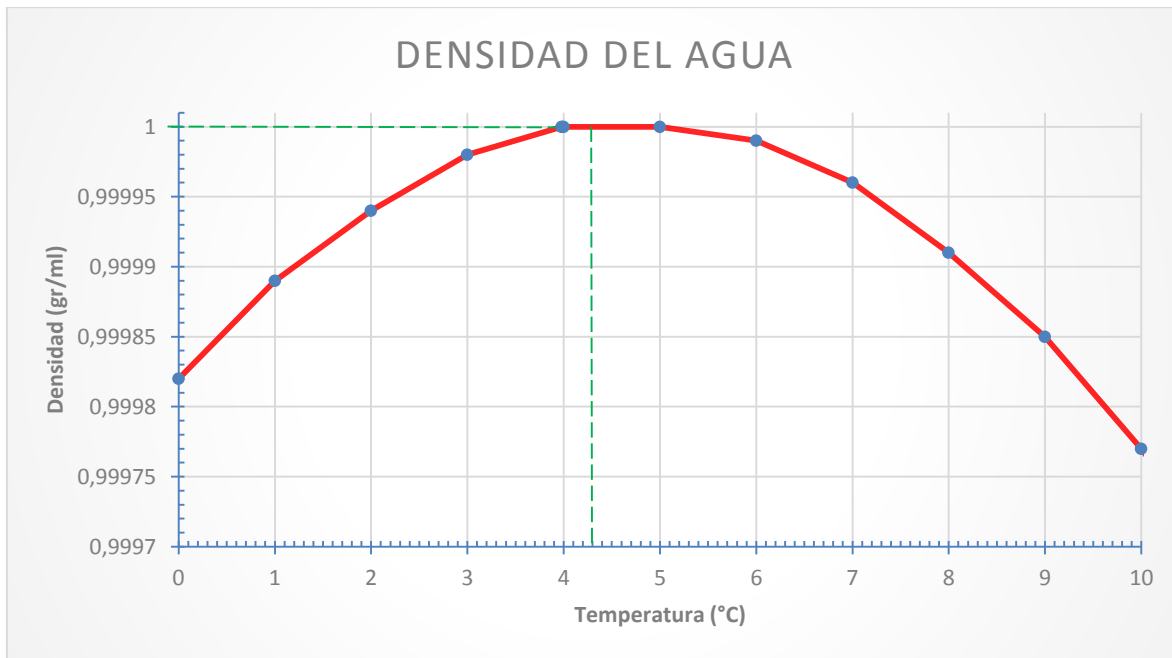


Ilustración 7. Densidad del agua a diferentes temperaturas

Fuente: (Santibañez, 2018). Obtenido de: <https://es.scribd.com/https://es.scribd.com/doc/94148509/Densidad-del-agua-entre-0-y-100-C>

Entre 0 y 3.98 °C, el incremento de la temperatura facilita la ruptura de algunos puentes de hidrógeno entre las moléculas, y como resultado se obtiene el aumento en la densidad del agua. Entre 3.98 °C y 100 °C, el incremento de temperatura aumenta la energía cinética de las moléculas de agua, las cuales se expanden aumentando su volumen y como resultado se obtiene la disminución de la densidad del agua.

Pero, además cuando el agua se solidifica (forma hielo), a una temperatura de 0°C y presión atmosférica, su densidad disminuye, tomando un valor de 0.917 g/mL. Este extraño comportamiento se asocia al aumento de volumen que sucede como consecuencia del aumento del número de puentes de hidrógeno entre moléculas de agua, que implican un aumento en la distancia entre estas.

### 3.1.2. Propiedades del agua marina

El agua de mar es salada debido a la concentración de sales minerales disueltas que contiene. La salinidad marina se define como la masa, expresada en gramos, de material inorgánico disuelto en 1 kg de agua de mar, (<http://aulavirtual.usal.es>, 2018). Seis componentes, todos ellos iones, conforman más del 99% de la composición total de solutos, así:

Tabla 5. Composición de solutos sólidos del agua de mar

| ANIONES                                      |  |         | CATIONES                      |               |         |
|--|--|---------|-------------------------------|---------------|---------|
|  | (% del total)                                  | (gr/m3) |                               | (% del total) | (gr/m3) |
| Cloruro (Cl <sup>-</sup> )                   | 55,29  | 20.000  | Sodio (Na <sup>+</sup> )      | 30,75         | 10.000  |
| Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )    | 7,75   | 2.700   | Magnesio (Mg <sup>++</sup> )  | 3,70          | 1.300   |
| Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) | 0,41   |         | Calcio (Ca <sup>++</sup> )    | 1,18          | 400     |
| Bromuro (Br <sup>-</sup> )                   | 0,19   |         | Potasio (K <sup>+</sup> )     | 1,14          | 400     |
| Fluor (F <sup>-</sup> )                      | 0,0037   |         | Estroncio (Sr <sup>++</sup> ) | 0,022         |         |
| <b>Molécula no disociada</b>                 | Ácido bórico (H <sup>3</sup> BO <sup>3</sup> ) |         |                               | 0,076         |         |

Fuente: (<https://es.wikipedia.org>, 2018). Obtenido de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Agua\\_de\\_mar](https://es.wikipedia.org/wiki/Agua_de_mar)

La concentración de estos componentes en el agua marina presenta muy poca variabilidad, razón por la que se considera constante. Esta uniformidad permite acuñar el término “salinidad marina” que se expresa en tanto por mil (‰) o milésimas partes de la

unidad. El agua del mar tiene una salinidad promedio de 35 ‰ (3.5 %) la cual representa una concentración de cloruro de aproximadamente 0.56 mol L<sup>-1</sup> (<http://aulavirtual.usal.es>, 2018).

La densidad típica del agua del mar (agua salada con un 3,5 % de sales disueltas) fue calculada por la UNESCO mediante la ecuación internacional de estado del agua de mar a presión atmosférica, basándose en la escala práctica de salinidad (PSS-78) y la ecuación internacional del estado del agua de mar (EOS-80) (Fofonoff N.P. & R.C. Millard Jr., 1983, pág. 15), entregando los siguientes valores:

*Tabla 6. Densidad del agua de mar*

| DENSIDAD ( $\rho$ )<br>kg/L | TEMPERATURA (t)<br>(°C) |
|-----------------------------|-------------------------|
| 1,02819                     | -2                      |
| 1,02811                     | 0                       |
| 1,02778                     | 4                       |
| 1,03                        | 20                      |

El pH en los océanos es bastante uniforme y se mantiene en el estrecho margen de 7.5 a 8.2

### **3.1.3. Fenómeno de evaporación**

A medida que aumenta la temperatura, empieza a suceder el proceso de vaporización de agua, durante el cual se van destruyendo los puentes de hidrógeno que mantenían las moléculas de agua unidas, de tal forma que la fase de vapor de agua no conserva la estructura de enlaces de hidrógeno.



Ilustración 8. Proceso de vaporización del agua

Fuente: (Fermi, 2015). Obtenido de: <https://www.youtube.com/watch?v=2LQtQnW0a4I>

Es así como el agua líquida se va transformando en vapor y se retira de la superficie evaporante.

Calor de vaporización del agua,  $\Delta H_v = 40.6 \text{ kJ/mol}$

El valor de la capacidad calorífica del agua, es decir, la energía necesaria para elevar la temperatura en una unidad manteniendo la presión,  $C_p = 75.3 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

#### **3.1.4. Proceso de evaporación a temperatura ambiente**

La manera como la naturaleza recicla y purifica el agua a través del ciclo hidrológico ha sido ampliamente estudiada desde hace más de 2.000 años. Desde análisis presentados por el Rey Salomón, Aristóteles, Sócrates, pasando por las teorías trasmutacionistas y conservacionistas subterráneas y aéreas presentadas por Plinio el viejo, Descartes,

Homero, siguiendo con las teorías planteadas por Robert Hooke (1635), Giovanni Batista Riccioli, Pierre Perrault (1673), E. Mariotte, Henry Sheeres, hasta la demostración de la evaporación del agua de mar presentada por Edmond Halley (1678), donde deja en claro que la temperatura, la incidencia directa del sol y el viento influyen directamente en el proceso. Con esta exposición de Halley, queda definido completamente el ciclo hidrológico (Ayut, 2006). En palabras simples, el Sol calienta el agua, esta se evapora en forma de agua pura (H<sub>2</sub>O) y es precipitada otra vez a la tierra, todo por los denominados efectos de evaporación, condensación y precipitación.



Ilustración 9. Ciclo hidrológico abreviado  
Fuente: (Agua pura y sana, 2017) Obtenido de: <https://aguapuraysana.com/destilacion-de-agua-un-proceso-natural/>

Como ya se explicó en el Capítulo 2 – **Estado del arte**, los equipos equipados con tecnología que inducen el cambio de fase del agua a tratar por medio de energía térmica, se sirven de los fenómenos de evaporación y condensación. El método simplemente

consiste en imitar el ciclo natural del agua, calentando agua de mar para producir vapor y luego enfriar este vapor para condensarlo y precipitarlo.

El equipo desarrollado en esta investigación se basa en los métodos que usan calor. Bajo este precepto, el postulado es que, los profusos sistemas hasta ahora implementados con esta técnica, emplean diferentes fuentes de calor con el objetivo de inducir el fenómeno de evaporación, pero, solo están utilizando la variable de temperatura para tal efecto, descuidando inexplicablemente la otra importante variable involucrada en el fenómeno y destacada por Halley, como es la VELOCIDAD DEL VIENTO.

La idea nace por simples observaciones de actividades cotidianas:

a.-) Cuando en el patio de cualquier casa de familia, se extendía la ropa mojada sobre una cuerda para que se secase. Las observaciones eran las siguientes:

- ✚ Si la población era de tierra caliente, esto es, si el día era cálido, la ropa se secaba en pocas horas.
- ✚ Si la población era de tierra fría, esto es, si el día era frío, la ropa tardaba 24 horas o más en secarse.



Ilustración 10. Tendedero

Fuente: (Toldos Ourense, 2016) Obtenido de: <https://www.toldosourense.com>  
<https://www.toldosourense.com/blog/cubretendederos-por-que-es-recomendable-instalarlos/>

Pero además:

- ✚ Si la ropa se extendía en un patio al aire libre, con presencia de corrientes de viento, esto aceleraba el proceso de evaporación del agua.
- ✚ Si la ropa se extendía en un patio cerrado, sin acceso a corrientes de viento, el proceso de evaporación se tornaba muy lento.

b.-) En una visita a la playa, cuando se sale del agua, si el día es cálido y ventoso, no es necesario secar la piel con una toalla, porque en cuestión de minutos la temperatura ambiente y las corrientes de aire te secarán.





Ilustración 11. Corrientes de viento en la playa

Fuente: (pxhere, 2019) Obtenido de: <https://pxhere.com>  
<https://pxhere.com/es/photo/505882>

Estos simples ejemplos cotidianos demuestran que el agua siempre tiende a convertirse en gas -evaporación-, y que este proceso se puede dar a cualquier temperatura (Rodríguez, 2016). Muestra también que –como comprobó Halley-, mucho mejor y más rápido se producirá el fenómeno, cuanto más elevada sea la temperatura ambiente y mayores corrientes de viento se presenten.

Finalmente, y más importante, es el hecho de que no es necesario llevar el agua hasta temperatura de ebullición para producir el fenómeno de evaporación. A temperatura ambiente se presenta la evaporación tan solo de las moléculas presentes en la superficie

del agua. El fenómeno se presenta porque por efecto de las continuas colisiones, algunas de las moléculas de agua situadas en la superficie obtienen la suficiente velocidad que les permite escapar y liberarse al aire en forma de vapor, creando una nube de vapor junto a la superficie.

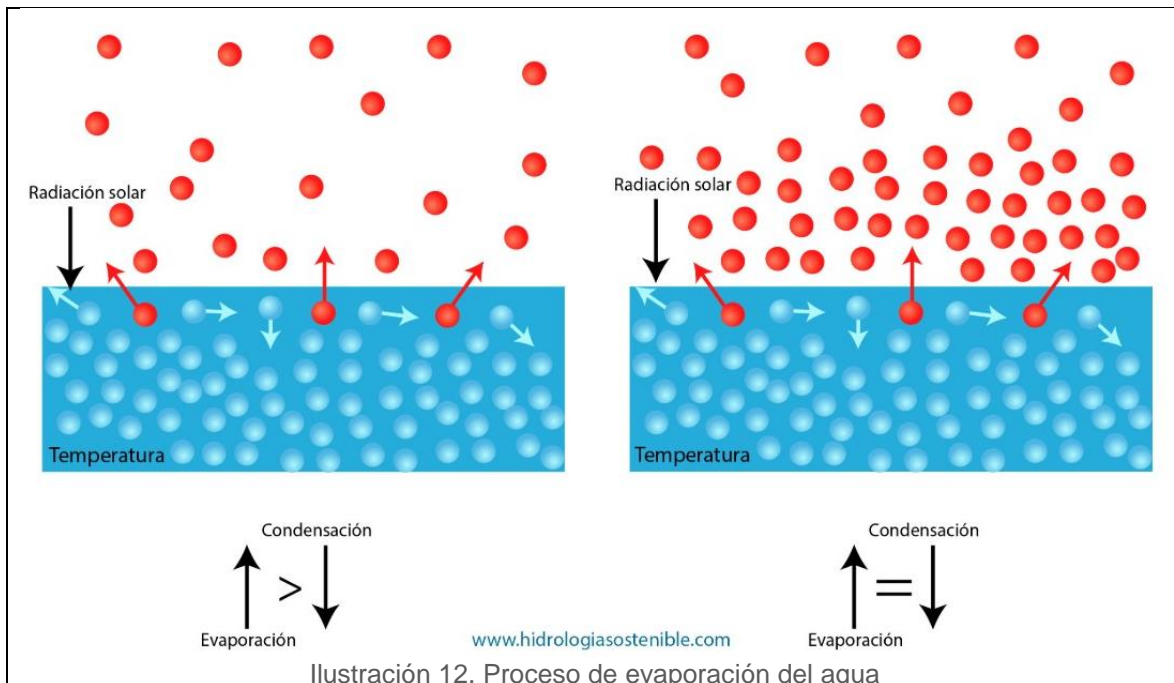


Ilustración 12. Proceso de evaporación del agua

Fuente: (Hidrología Sostenible, 2016) Obtenido de: <http://hidrologiasostenible.com>  
<http://hidrologiasostenible.com/evapora-agua-del-mar-100-grados/>

Para evitar que esas moléculas contenidas en la nube de vapor regresen a la superficie del agua, se requiere disponer de una corriente de viento que las retire de la zona y de esta manera permitir que el proceso de evaporación de otras moléculas de agua se repita, pues, estas nuevas moléculas se convierten en la nueva superficie, creando lo que yo denomino, un proceso continuo de evaporación por “capas”. Así las cosas, la razón del porqué se evapora más rápido el agua de la piel mojada que el agua de un vaso de agua radica en la mayor cantidad de “capas” que se deben evaporar en el vaso con agua.

Definidas de esta manera las variables que se involucran en el proceso de evaporación a temperatura ambiente, a saber: temperatura, viento y espesor de la capa de agua a evaporar, el proyecto contempló las siguientes operaciones unitarias para controlarlas y potenciarlas:

#### **3.1.4.1. Proceso de suministro de calor**

Como ya se ha explicado, en cuanto mayor temperatura ambiente se tenga, mayor evaporación se presentará. Con el fin elevar la temperatura del aire, se plantea utilizar un intercambiador de calor “**unidad condensadora**” que transfiera energía térmica desde un gas refrigerante hacia el volumen de aire. El funcionamiento, diseño y construcción de esta unidad condensadora se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, numeral 3.2. **Unidad condensadora.**

#### **3.1.4.2. Proceso de generación de viento**

Como ya se indicó, a mayores corrientes de viento involucradas, mayor evaporación se presenta. Con el objetivo de crear las corrientes de viento necesarias, se plantea utilizar dos ventiladores mecánicos, uno centrífugo y otro axial, cuyo funcionamiento, diseño y construcción se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, numeral 3.2.2.2. **Ventilador.** Ahora bien, para poder controlar estas corrientes de viento se propuso la implementación de un “túnel de viento”, cuyo funcionamiento, diseño y construcción se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, numeral 3.3. **Túnel de viento.**

### **3.1.4.3. Control de la capa de agua a evaporar**

Como se planteó en párrafos anteriores, cuanto más delgada sea la capa de agua a evaporar, más efectivo será el proceso de evaporación a temperatura ambiente. Por extensión, cuanto mayor área tenga la superficie del agua, mayor evaporación se produce.

Con la necesidad de tener una capa delgada de agua para evaporar, se plantea utilizar un sistema regulado de suministro de agua de mar, cuyo funcionamiento, diseño y construcción se explica con mayor detalle en el Capítulo 3.4. **Equipo dosificador de agua cruda.**

Con el fin de disponer de la mayor superficie de evaporación posible, se plantea el uso de una banda absorbente de tipo rotatoria, cuyo funcionamiento, diseño y construcción se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, numeral 3.4.2.4. **Banda absorbente.**

### **3.1.5. Proceso de condensación de agua y recolección de agua condensada**

La primera idea para la conceptualización del sistema de condensación de agua, así como del sistema de recolección de agua condensada o tratada, nace al leer un artículo de prensa reproducido por el periódico peruano EL PAIS el día 2 de agosto de 2016. En el reportaje titulado: *“MAURA - REDES DE NIEBLA ESTÁN TRANSFORMANDO LA MONTAÑA DE ARENA SOBRE LA QUE MAURA VIVE EN UN OASIS VERDE, HACIENDO REALIDAD SU SUEÑO”* (Future Cities, 2016), llevado a cabo por el proyecto periodístico

“*Future Cities*”, apoyado por el Programa de Becas Innovación para el Desarrollo del Centro Europeo de Periodismo (EJC, por sus siglas en inglés) y financiado por la Fundación Bill y Melinda Gates, se hace referencia a que la “Fundación Peruanos sin Agua”, con la ayuda de “USAID” y de la fundación holandesa “Nederlandse Creating Water Foundation” ha instalado 160 redes atrapa nieblas en siete distritos diferentes localizados en las goteras de la ciudad de Lima – Perú.



Ilustración 13. Redes atrapa nieblas instaladas en la ciudad de Lima

Fuente: (Future Cities, 2016). Obtenido de: <http://www.futurecities.nl>  
<http://www.futurecities.nl/es/people/maura-es/>

Explican en el mencionado artículo de prensa que, una red atrapa niebla no es más que una red de nailon de malla fina de seis por cuatro metros, firmemente tensada entre dos postes de madera. El funcionamiento es simple y consiste en que cuando el viento empuja la niebla a través de la red, pequeñas gotas de agua quedan atrapadas en esta; las gotitas atrapadas se van juntando para formar gotas de agua más grandes, que se deslizan gracias a la gravedad hacia su destino final: un aljibe.





Ilustración 14. Estructura General del Atrapa Niebla

Fuente: (Future Cities, 2016). Obtenido de: <http://www.futurecities.nl>  
<http://www.futurecities.nl/es/people/maura-es/>

Menciona además el artículo que, en días favorables, y dependiendo de la humedad relativa, la red recoge entre 200 y 400 litros de agua.



Ilustración 15. Atrapa niebla y canaleta de recolección

Fuente: (Future Cities, 2016). Obtenido de: <http://www.futurecities.nl>  
<http://www.futurecities.nl/es/people/maura-es/>

Es claro que el fenómeno físico que induce la recolección de agua en las redes atrapa niebla, corresponde al proceso de condensación de las moléculas de agua contenidas en el aire. La condensación es el cambio de fase del agua que se encuentra en forma gaseosa y que pasa a forma líquida, y este cambio, se presenta -en este caso- a presión atmosférica.

El mecanismo de condensación del agua tiene lugar cuando el aire se enfría hasta su punto de rocío y, para que el vapor se condense en la malla de nilón, la temperatura de la malla debe ser menor que la temperatura del vapor. Durante este proceso la molécula de agua pierde energía y la libera en forma de calor.

Se utilizó entonces el principio físico de condensación del agua combinado con la metodología utilizada en la red atrapa niebla para la concepción, diseño y construcción de la “unidad de evaporación” propuesta en el proyecto. De esta manera, y con el fin de tomar el volumen de aire caliente y húmedo -que se transporta por el túnel de viento desde la unidad condensadora-, para enfriarlo hasta su punto de rocío, se plantea utilizar un intercambiador de calor “**Unidad evaporadora**”, que transfiera energía térmica desde la masa de aire caliente hacia un gas refrigerante que se encuentra a una temperatura menor. El funcionamiento, diseño y construcción de esta unidad evaporadora se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, numeral 3.5. **Unidad evaporadora.**

Finalmente, el sistema de recolección de agua condensada o tratada aprovecha la fuerza de gravedad mediante la colocación de una canaleta ubicada bajo el sistema de

condensación que se encarga de recoger y transportar el agua precipitada hacia un recipiente de disposición final. El proceso se explica en detalle en el Capítulo 3, numeral 3.7. **Recolección de agua tratada.**

### **3.1.6. Integración de los procesos de evaporación y condensación**

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos específicos del proyecto obedece a encontrar las condiciones óptimas de operación del equipo desalinizador con el objetivo de obtener la máxima eficiencia de destilación con el menor gasto energético posible (ver numeral 1.2.3. **Optimización de los procesos**), Se pretende integrar los procesos de evaporación (elevar la temperatura del aire, mediante un intercambiador de calor denominado “**Unidad condensadora**”) y de condensación (enfriar hasta su punto de rocío el volumen de aire caliente y húmedo mediante un intercambiador de calor denominado “**Unidad evaporadora**”), utilizando un equipo compresor denominado “**Módulo de compresión**”, cuyo funcionamiento, diseño y construcción se explica con mayor detalle en el Capítulo 3, numeral 3.6. **Módulo de compresión.** El medio fluido que se encargará de suministrar o absorber la energía necesaria para lograr los procesos de calentamiento y enfriamiento corresponde a un gas refrigerante, cuyas características fisicoquímicas y propiedades térmicas se explican a continuación.



### 3.1.6.1. Gas refrigerante

El gas refrigerante es un fluido cuya composición química le permite absorber el calor de un espacio determinado y liberarlo en otro espacio. Es un fluido capaz de transportar el calor de un lado a otro en cantidades suficientes para incrementar o disminuir la temperatura.

### 3.1.6.2. Clasificación de los gases refrigerantes

Se clasifican por su tipo en orgánicos e inorgánicos:

*Tabla 7. Gases refrigerantes Orgánicos e Inorgánicos*

| CLASIFICACIÓN | ELEMENTO           | TIPO REFRIGERANTE |
|---------------|--------------------|-------------------|
| ORGÁNICOS     | METANO             | R11               |
|               |                    | R12               |
|               |                    | R13               |
|               |                    | R14               |
|               |                    | R22               |
|               | ETANO              |                   |
|               | PROPANO            |                   |
| BUTANO        |                    |                   |
| INORGÁNICOS   | NITRÓGENO          |                   |
|               | AMONÍACO           | AMONÍACO + AGUA   |
|               | DIOXIDO DE AZUFRE  |                   |
|               | BIÓXIDO DE CARBONO |                   |

Se clasifican de acuerdo en la forma que intercambian calor en:

| TIPO                                     | CARACTERÍSTICA             | DESCRIPCIÓN   |
|--|----------------------------|---|
| FRIGORÍGENOS O REFRIGERANTES PRIMARIOS   | TRANSPORTAN CALOR LATENTE  | Absorben calor latente a baja temperatura y presión para luego cederlo a alta temperatura y presión.<br>La transferencia de calor implica el cambio de estado del refrigerante de líquido a gas y viceversa |
| FRIGORÍFEROS O REFRIGERANTES SECUNDARIOS | TRANSPORTAN CALOR SENSIBLE | La transferencia de calor se hace sin cambio de estado  |

Los gases frigorígenos o primarios se clasifican por su composición química en:

Tabla 8. Clasificación de los gases Frigorígenos según su composición química

| CLASIFICACIÓN   | ELEMENTO        | TIPO REFRIGERANTE |   |
|---|-----------------|-------------------|---|
| CLOROFLUOROCARBONOS (CFC)<br>*Actualmente su uso está prohibido                               | CLORO           | R11<br>R12        |   |
|   | FLUOR           |                   |   |
|   | CARBONO         |                   |   |
| HIDROCLOROFLUOROCARBONOS (HCFC)<br>*Contienen menos cloro<br>*Prohibidos en Europa desde 2015 | CLORO           | FLUIDOS PUROS     | R22<br>R123                                       |
|   | FLUOR           |                   |   |
|   | CARBONO         | MEZCLAS           | Basados en R22                                    |
| HIDROFLUOROCARBONOS (HFC)<br>*No contiene cloro   | FLUOR           | FLUIDOS PUROS     | R134A<br>R23                                      |
|   | CARBONO         | MEZCLAS           | R404A<br>R507<br>R407C<br>R417A<br>R410A<br>R508B |
| NO HALOGENADOS<br>*Se consideran ecológicos<br>*Son altamente inflamables                     | PROPANO         | HIDROCARBUROS     | R290  |
|   | BUTANO          |                   | R600  |
|   | ISOBUTANO       |                   | R600A   |
|   | NH <sub>3</sub> | INORGÁNICOS       | R717  |
|   | AGUA            |                   | R718  |
|   | CO <sub>2</sub> |                   | R744  |

Fuente: (Refrigeración del Sur, 2018) Obtenido de: <http://refrigeraciondelsur.blogspot.com/>  
<http://refrigeraciondelsur.blogspot.com/2018/04/pdfvideo-sobre-ciclo-de.html>

Se clasifican de acuerdo con su presión de trabajo en:

Tabla 9. Clasificación de los gases refrigerantes según su presión de trabajo

| PRESIÓN          | TEMPERATURA DE EBULLICIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA | TIPO REFRIGERANTE |
|------------------|---|-------------------|
| BAJA PRESIÓN     | > 20°C  | R123              |
|                  |   | R113              |
| MEDIA PRESIÓN    | 20°C a -30°C                                    | R134A             |
|                  |   | R40               |
|                  |   | R60               |
| ALTA PRESIÓN     | -30°C a -80°C                                   | R717              |
|                  |   | R22               |
|                  |   | R410A             |
|                  |   | R404              |
|                  |   | R407C             |
| MUY ALTA PRESIÓN | < -80°C   | R13               |
|                  |   | R14               |

Los refrigerantes fabricados a base de fluidos puros tienen la propiedad de que, a cada valor de presión corresponde una temperatura de ebullición.

Los gases producto de la mezcla de refrigerantes puros se clasifican en:

**MEZCLAS AZEOTRÓPICAS:** Están formadas por dos o más componentes dosificados en proporciones precisas. Tienen la propiedad de que se comportan como un solo componente durante los cambios de fase de condensación a evaporación y viceversa. Esto quiere decir que en el momento que se presentan los cambios de fase, la temperatura de saturación es constante, lo que quiere decir que las propiedades de la mezcla no varían con el cambio de fase a presión constante. Esto sucede porque los componentes tienen la misma temperatura de evaporación a la presión de la mezcla.

**MEZCLAS ZEOTRÓPICAS:** Están formadas por dos o más componentes dosificados en proporciones precisas. Tienen la propiedad de que no se comportan como un solo componente durante los cambios de fase de condensación a evaporación y viceversa, debido a que los componentes tienen diferente punto de ebullición, lo que hace que, al cambiar al estado gaseoso, lo hacen a diferente tiempo. Esta condición provoca una modificación de las características de la mezcla durante el proceso de evaporación que técnicamente se llama "FRAGMENTACIÓN". En la práctica, si se produce una fuga de gas, el componente más volátil se evaporará más rápidamente, lo que producirá una variación en el porcentaje de la mezcla y cambiará sus características.

En los refrigerantes fabricados con base en la mezcla de dos fluidos puros, se debe asociar dos temperaturas asociadas a la presión, a saber:

**TEMPERATURA DE BURBUJA:** También llamada temperatura de vapor saturado. Cuando se calienta a presión constante una mezcla en estado líquido, se alcanza una temperatura donde aparece la primera burbuja de vapor.

**TEMPERATURA DE ROCIO:** También llamada temperatura de líquido saturado. Cuando se enfría a presión constante una mezcla en estado gaseoso, se alcanza una temperatura donde aparece la primera gota de líquido.

**DESLIZAMIENTO:** Se denomina deslizamiento a la diferencia entre la temperatura de burbuja y la temperatura de rocío a una presión determinada. Es producto del fraccionamiento de la mezcla en dos fluidos y en las mezclas conocidas varía entre 1 y 7 grados centígrados.

$$D_Z = (T_B - T_R)$$

Donde:

- D<sub>Z</sub>: Deslizamiento
- T<sub>B</sub>: Temperatura de burbuja
- T<sub>R</sub>: Temperatura de rocío

Cuando el valor de deslizamiento de una mezcla de refrigerante es grande -superior a 4,5 grados centígrados-, y se llega a presentar una fuga en el sistema, uno de los componentes escapa a mayor velocidad que el otro, lo que cambia las proporciones de la mezcla y provoca que las condiciones de diseño se alteran sustancialmente, ya que las presiones de vaporización y de condensación cambian, así como el calor latente y el calor sensible. Por este motivo, siempre es deseable trabajar con mezclas de refrigerantes que posean un valor de deslizamiento tan pequeño que no afecte las condiciones de diseño y la operación del sistema, es decir, trabajar con mezclas consideradas casi azeotrópicas.

### **3.1.6.3. Selección del gas refrigerante**

Teniendo en cuenta que dos de las operaciones unitarias que integran el Equipo EVAPORADOR – CONDENSADOR corresponden a la unidad condensadora y a la unidad evaporadora, donde la primera utilizará un intercambiador de calor para elevar la temperatura del aire, mientras que la segunda utilizará un intercambiador de calor para tomar el volumen de aire caliente y húmedo y enfriarlo hasta su punto de rocío, el gas refrigerante se presenta como el medio ideal para lograr los dos objetivos, toda vez que como ya se dijo antes, la composición química del gas refrigerante le permite absorber el calor de un espacio determinado, transportar dicho calor y liberarlo en otro espacio.

Se escogerá un refrigerante de tipo primario o frigorígeno, es decir que la transferencia de calor se haga por medio del cambio de estado del refrigerante de líquido a gas y viceversa, para garantizar que esta transferencia de calor -absorber el calor latente a baja temperatura y presión para luego cederlo a alta temperatura y presión-, se haga dentro

de unos mayores rangos de temperatura y presión, lo que garantizará que los dos procesos sean lo más eficientes posible. Los gases que cumplen con esta condición son los que trabajan a alta presión o a muy alta presión.

Adicionalmente, el gas refrigerante a utilizar deberá ser amigable con el medio ambiente y permitido por la autoridad ambiental correspondiente. Para tal efecto, los refrigerantes de tipo HIDROFLUOROCARBONOS -HFC-, que no contiene cloro y además no son inflamables, se consideran los más adecuados.

Finalmente, la mezcla de refrigerante escogido deberá presentar un valor de deslizamiento muy pequeño que evite su fragmentación y pueda operar en condiciones estables y controladas.

Una vez evaluadas todas las condiciones establecidas, se opta por trabajar con la mezcla de gas refrigerante **R410A**.

### 3.1.6.4. Ficha técnica del gas refrigerante r410a

#### 3.1.6.4.1. Características y aplicaciones

El R410A es una mezcla casi azeotrópica compuesta de R-125 y R-32; actualmente se utiliza fundamentalmente en los nuevos equipos de aire acondicionado que van apareciendo en el mercado. Es un producto químicamente estable, con un bajo deslizamiento (Glide) de temperatura y baja toxicidad. A pesar del carácter inflamable del R-32, la formulación global del producto hace que este no sea inflamable, incluso en caso de fugas. Está clasificado como A1 grupo L1 (Gas Servei, 2019).

#### 3.1.6.4.2. Toxicidad y almacenamiento

El R-410A tiene muy baja toxicidad incluso después de repetidas exposiciones. El valor del AEL (Allowance Exposure Limit) es de 1000 ppm (8 horas TWA). Los envases que contengan R-410A deben almacenarse en áreas frías y ventiladas lejos de fuentes de calor. En el caso de fugas los vapores se concentrarán a nivel de suelo desplazando al oxígeno del aire ambiente; en tal caso hay que tomar precauciones a la hora de evacuar el área afectada (Gas Servei, 2019).

#### 3.1.6.4.3. Componentes

Tabla 10. Componentes del Gas Refrigerante R410A

| Nombre químico           | % en peso | Nº CAS   | Nº . CE   |
|--------------------------|-----------|----------|-----------|
| Pentafluoroetano (R-125) | 50        | 354-33-6 | 206-557-8 |
| Difluorometano (R-32)    | 50        | 75-10-5  | 200-839-4 |

fuelle: (Gas Servei, 2019) Obtenido de: <https://www.gas-servei.com/https://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>

### 3.1.6.4.4. Propiedades físicas

Tabla 11. Propiedades físicas del Refrigerante R410A

| PROPIEDADES FISICAS                                   | UNIDADES             | R-410A       |
|---|----------------------|--------------|
| Peso molecular  | (g/mol)              | 72.6         |
| Temperatura ebullición (a 1,013 bar)                  | (°C)                 | -51.58       |
| Deslizamiento temperatura de ebullición (a 1,013 bar) | (K)                  | 0.1          |
| Temperatura crítica                                   | (°C)                 | 72.13        |
| Presión crítica                                       | (bar abs)            | 49.26        |
| Densidad crítica                                      | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 488,90       |
| Densidad del líquido (25°C)                           | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1062         |
| Densidad del líquido (-25°C)                          | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 1273         |
| Densidad del vapor saturado (25°C)                    | (Kg/m <sup>3</sup> ) | 4,12         |
| Presión del vapor (25°C)                              | (bar abs)            | 16.5         |
| Presión del vapor (-25°C)                             | (bar abs)            | 3.30         |
| Calor de vaporización a punto de ebullición           | (KJ/Kg)              | 276          |
| Calor específico del líquido (25°C)                   | (KJ/Kg K)            | 1.84         |
| Calor específico del vapor (25°C) (1 atm)             | KJ/Kg K)             | 0.83         |
| Conductibilidad térmica del líquido (25°C)            | (W/mK)               | 0.088        |
| Conductibilidad térmica del vapor (25°C) (1 atm)      | (W/mk)               | 0.013        |
| Solubilidad con el agua (25°C)                        | ppm                  | despreciable |
| Límite de inflamabilidad                              | (% vol.)             | Ninguno      |
| Toxicidad (AEL)                                       | ppm                  | 1000         |
| ODP   | -                    | 0            |
| PCA (GWP)   | -                    | 2088*        |

\* De acuerdo con IPPCC-AR4/CIE (Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático)-2007

fuentes: (Gas Servei, 2019) Obtenido de: <https://www.gas-servei.com/>  
<https://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>



### 3.1.6.4.5. Gráfica comparativa temperatura/presión R-22- R-410A

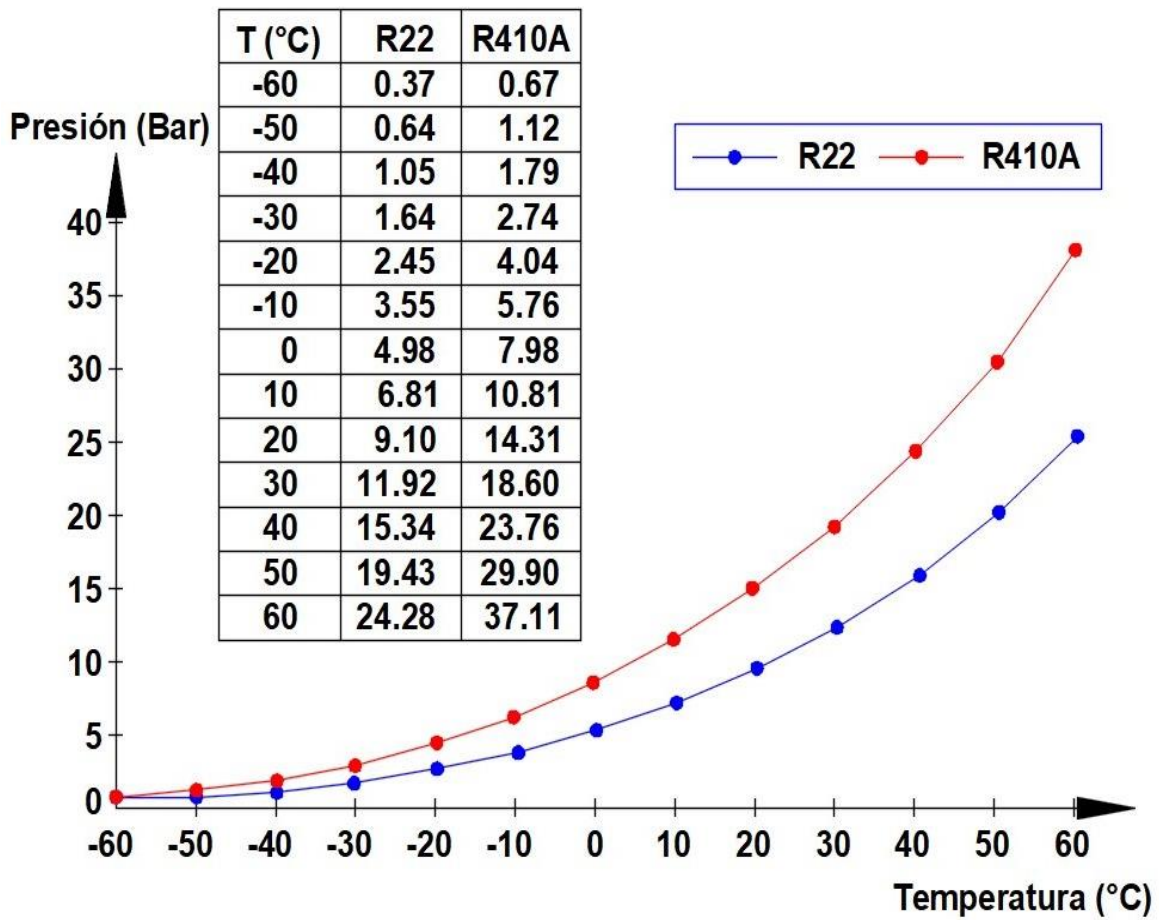


Ilustración 16. Gráfica comparativa temperatura/presión R-22- R-410A.

fuelle: (Gas Servei, 2019) obtenido de: <https://www.gas-servei.com/>  
<https://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>

### 3.1.6.4.6. Tabla de presión/temperatura

Tabla 12. Tabla de presión/temperatura para Gas Refrigerante R410A.

| TEMP. (°C) | PRESION ABSOLUTA (bar) |        | DENSIDAD (Kg/m <sup>3</sup> ) |        | ENTALPIA (kJ/Kg) |        | ENTROPIA (kJ/Kg.K) |        |
|------------|------------------------|--------|-------------------------------|--------|------------------|--------|--------------------|--------|
|            | BURBUJA                | ROCIO  | BURBUJA                       | ROCIO  | BURBUJA          | ROCIO  | BURBUJA            | ROCIO  |
| -50        | 1.124                  | 1.121  | 1339.59                       | 4.54   | 136.46           | 406.37 | 0.8104             | 2.0201 |
| -45        | 1.428                  | 1.424  | 1323.93                       | 5.67   | 143.01           | 409.29 | 0.8393             | 2.0066 |
| -40        | 1.793                  | 1.788  | 1308.01                       | 7.02   | 149.62           | 412.14 | 0.8679             | 1.9941 |
| -35        | 2.228                  | 2.222  | 1291.79                       | 8.62   | 156.31           | 414.92 | 0.8961             | 1.9823 |
| -30        | 2.740                  | 2.732  | 1275.24                       | 10.48  | 163.07           | 417.62 | 0.9240             | 1.9712 |
| -25        | 3.340                  | 3.330  | 1258.34                       | 12.65  | 169.91           | 420.23 | 0.9517             | 1.9607 |
| -20        | 4.036                  | 4.023  | 1241.03                       | 15.15  | 176.83           | 422.74 | 0.9791             | 1.9508 |
| -15        | 4.838                  | 4.821  | 1223.28                       | 18.04  | 183.83           | 425.13 | 1.0062             | 1.9413 |
| -10        | 5.757                  | 5.735  | 1205.04                       | 21.35  | 190.92           | 427.40 | 1.0331             | 1.9321 |
| -5         | 6.802                  | 6.774  | 1186.27                       | 25.13  | 198.11           | 429.52 | 1.0599             | 1.9233 |
| 0          | 7.984                  | 7.950  | 1166.89                       | 29.44  | 205.41           | 431.50 | 1.0864             | 1.9146 |
| 5          | 9.315                  | 9.274  | 1146.86                       | 34.34  | 212.81           | 433.31 | 1.1129             | 1.9061 |
| 10         | 10.805                 | 10.756 | 1126.10                       | 39.91  | 220.34           | 434.94 | 1.1392             | 1.8977 |
| 15         | 12.467                 | 12.408 | 1104.53                       | 46.22  | 228.00           | 436.38 | 1.1655             | 1.8892 |
| 20         | 14.312                 | 14.241 | 1182.05                       | 53.38  | 235.80           | 437.59 | 1.1918             | 1.8807 |
| 25         | 16.351                 | 16.269 | 1158.55                       | 61.50  | 243.77           | 438.56 | 1.2181             | 1.8720 |
| 30         | 18.598                 | 18.502 | 1133.91                       | 70.71  | 251.91           | 439.27 | 1.2445             | 1.8631 |
| 35         | 21.063                 | 20.954 | 1107.95                       | 81.18  | 260.26           | 439.68 | 1.2710             | 1.8538 |
| 40         | 23.760                 | 23.636 | 980.48                        | 93.12  | 268.84           | 439.76 | 1.2977             | 1.8442 |
| 45         | 26.701                 | 26.563 | 951.26                        | 106.79 | 277.69           | 439.46 | 1.3248             | 1.8339 |
| 50         | 29.899                 | 29.745 | 919.95                        | 122.55 | 286.87           | 438.72 | 1.3524             | 1.8229 |

fuelle: (Gas Servei, 2019) obtenido de: <https://www.gas-servei.com/>  
<https://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>

### 3.1.6.4.7. Diagrama de Mollier

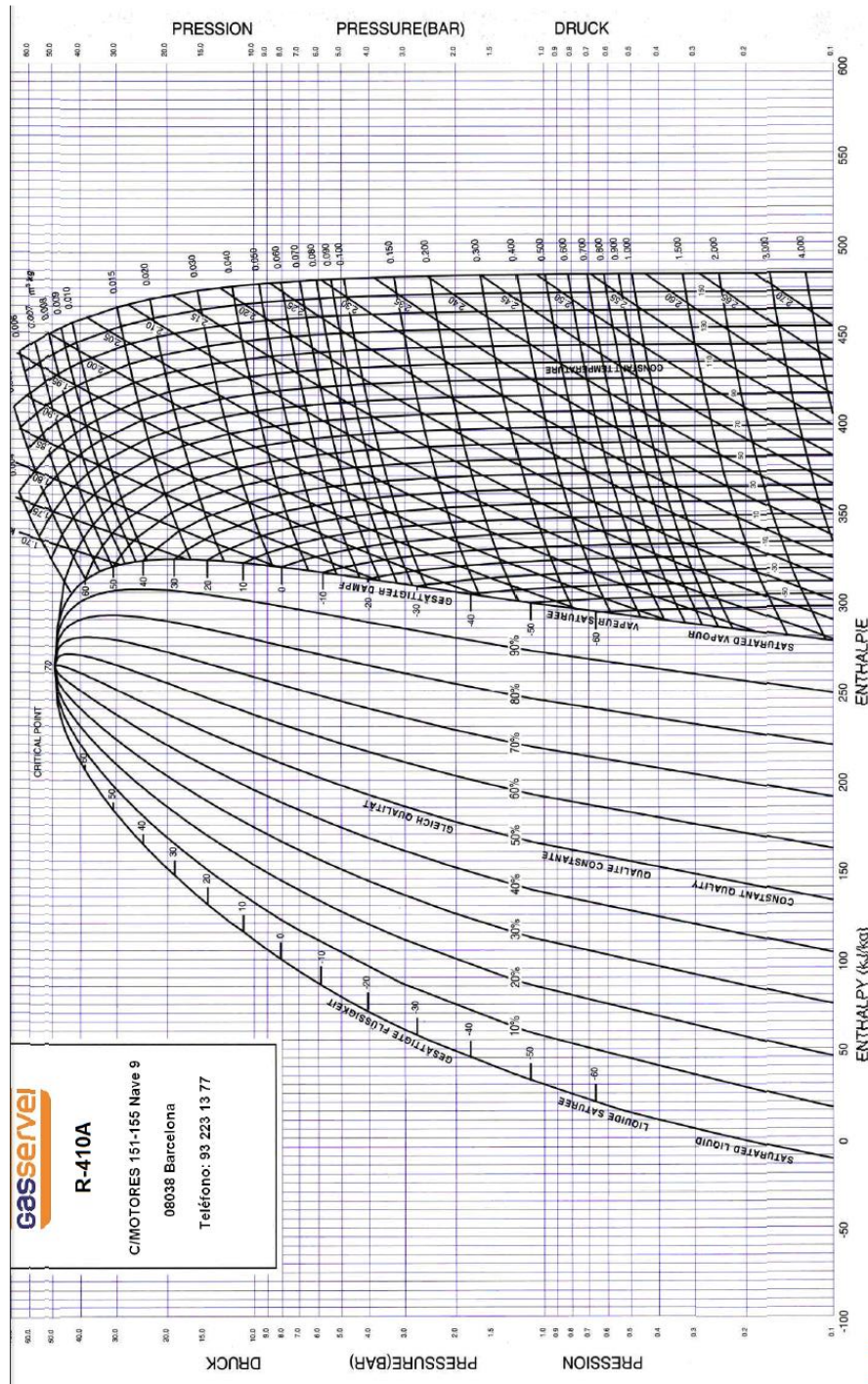


Ilustración 17. Diagrama de Mollier para Refrigerante R410A.

Fuente: (Gas Servei, 2019) obtenido de: <https://www.gas-servei.com/>  
<https://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>

## Diseño y construcción del equipo Evaporador – Condensador

El equipo EVAPORADOR – CONDENSADOR está compuesto por los siguientes elementos:

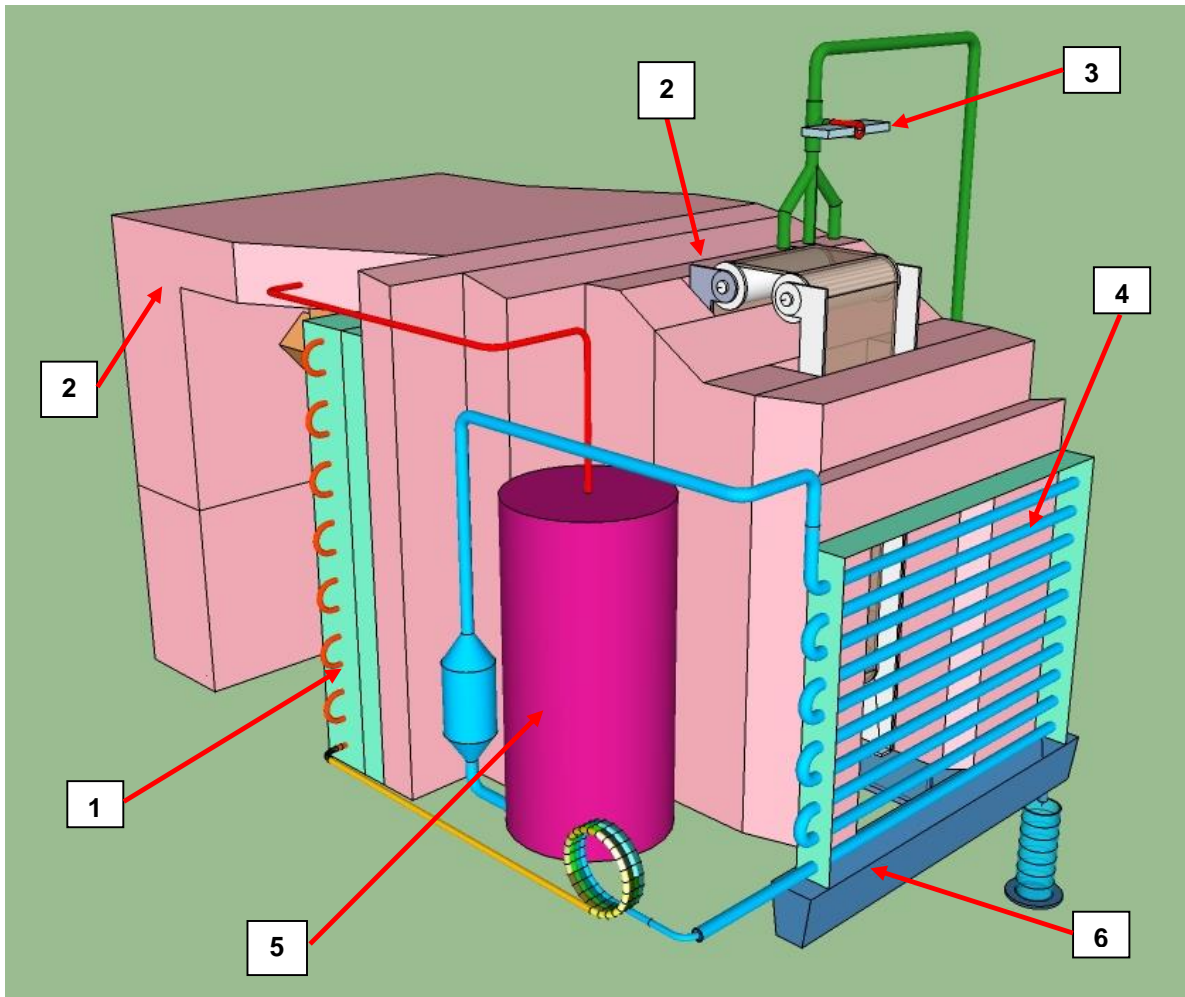


Ilustración 18. Equipo Condensador – Evaporador. Vista izquierda

Tabla 13. Componentes generales del equipo

| No. | COMPONENTE                    | OBSERVACIONES               |
|-----|-------------------------------|-----------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA           | Ver despiece en numeral 3.2 |
| 2   | TÚNEL DE VIENTO               | Ver despiece en numeral 3.3 |
| 3   | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA | Ver despiece en numeral 3.4 |
| 4   | UNIDAD EVAPORADORA            | Ver despiece en numeral 3.5 |
| 5   | MODULO DE COMPRESIÓN          | Ver despiece en numeral 3.6 |
| 6   | RECOLECCIÓN AGUA TRATADA      | Ver despiece en numeral 3.7 |



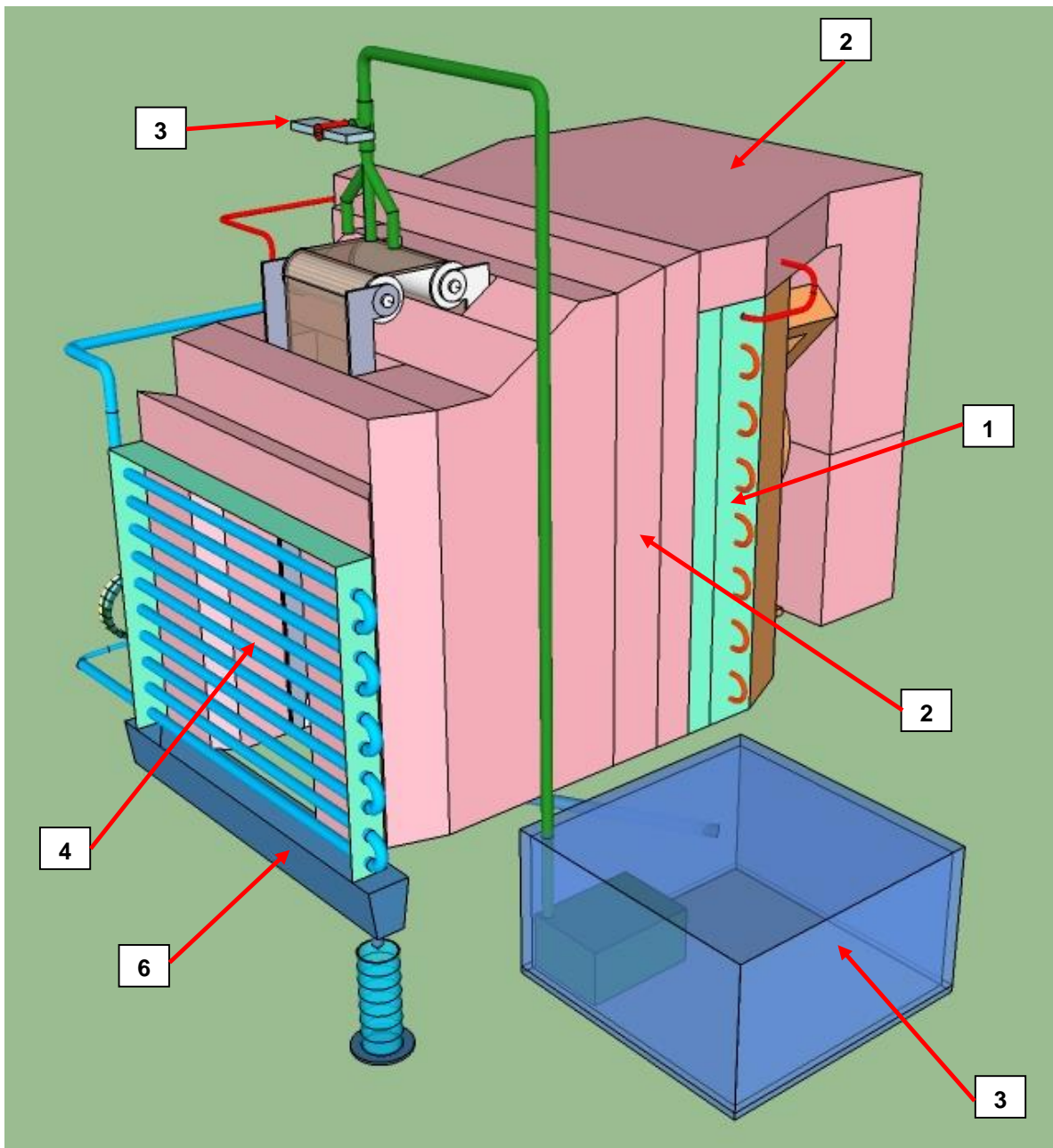


Ilustración 19. Equipo Condensador – Evaporador. Vista derecha

Tabla 14. Componentes generales del equipo

| No. | COMPONENTE                    | OBSERVACIONES               |
|-----|-------------------------------|-----------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA           | Ver despiece en numeral 3.2 |
| 2   | TÚNEL DE VIENTO               | Ver despiece en numeral 3.3 |
| 3   | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA | Ver despiece en numeral 3.4 |
| 4   | UNIDAD EVAPORADORA            | Ver despiece en numeral 3.5 |
| 5   | MODULO DE COMPRESIÓN          | Ver despiece en numeral 3.6 |
| 6   | RECOLECCIÓN AGUA TRATADA      | Ver despiece en numeral 3.7 |

## 3.2. Unidad condensadora

### 3.2.1. Tipos de Intercambiadores de calor

Un intercambiador de calor (IC) es un dispositivo empleado para transferir energía térmica entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido que están en contacto térmico y a diferentes temperaturas. Los flujos cambian su energía térmica, variando su calor sensible o su calor latente, o ambos (Durango Padilla, 2016, pág. 1).

**Intercambiador Directo:** En este tipo de intercambiadores de calor, la energía térmica se transmite por conducción de un fluido caliente a uno frío y aunque los flujos están en contacto, no se mezclan entre sí.

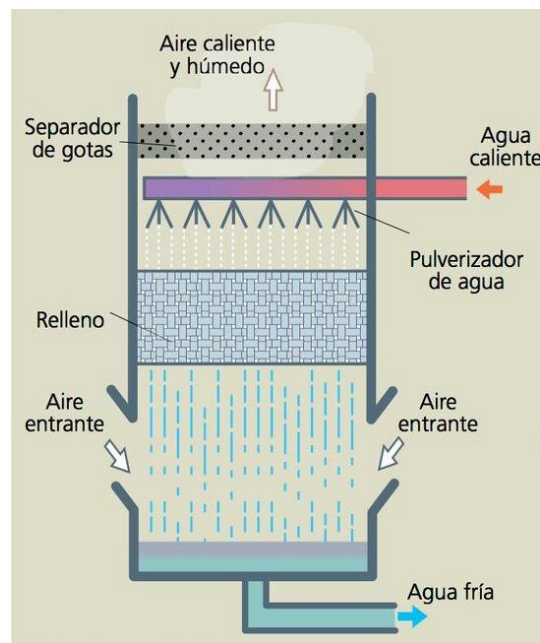


Ilustración 20 - Intercambiador directo. Esquema de operación de una torre de refrigeración

Fuente: (pinterest, 2020) Obtenido de <https://www.pinterest.es>  
<https://www.pinterest.es/pin/734438651726893182/>

**Intercambiador Indirecto de flujo periódico o regenerador:** En este tipo de intercambiadores de calor, el intercambio es intermitente y se presenta en una matriz (que puede ser móvil o fija) que es atravesada alternativamente primero por el fluido caliente y luego por el fluido frío. El primero le cede su calor a la matriz mientras que el segundo se calienta a su paso por esta. Aquí se presentan fugas de los fluidos debido a la diferencia de presión entre ellos y al movimiento que existe entre la matriz móvil y los conductos que transportan los dos flujos (caliente y frío).

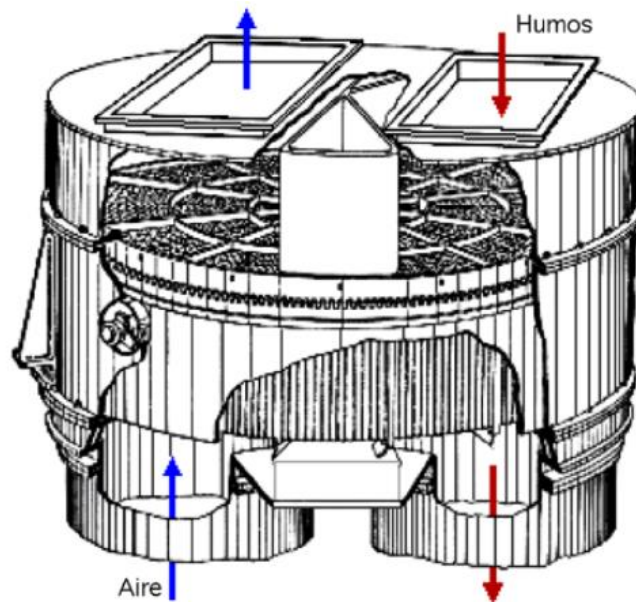


Ilustración 21 – Intercambiador indirecto. Calentador regenerativo de aire Ljungstrom

Fuente: (<https://docplayer.es/>, 2000) Obtenido de <https://docplayer.es/16323222-Xix-economizadores-y-calentadores-de-aire.html>

**Intercambiador Indirecto de acople líquido:** En este tipo de intercambiadores de calor, un líquido auxiliar permite el intercambio de calor entre los fluidos caliente y frío. Realmente, son dos intercambiadores indirectos conectados térmicamente mediante un

líquido bombeado, el cual circula primero por el intercambiador caliente, donde toma calor, y luego pasa por el intercambiador frío, donde entrega calor.

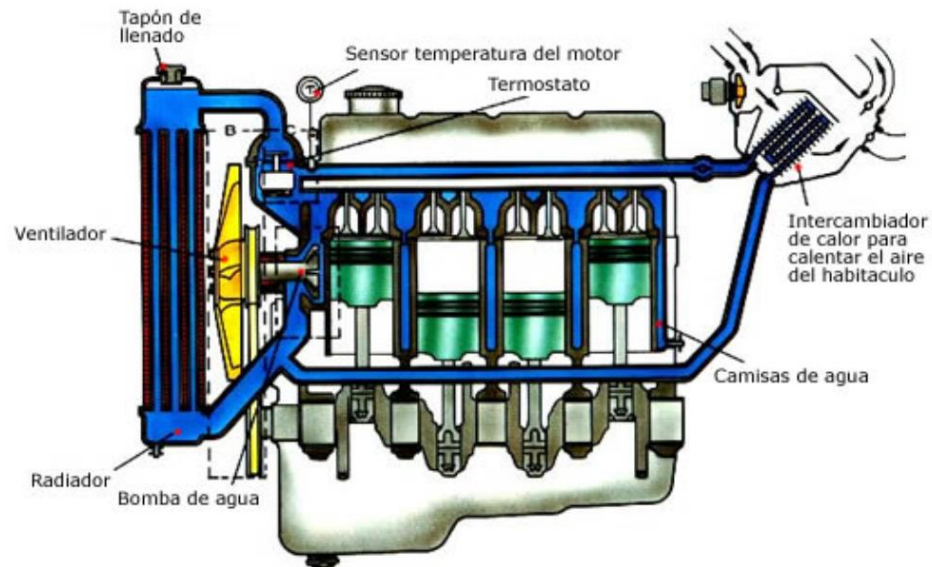


Ilustración 22 - Intercambiador Indirecto de acople líquido. Sistema de refrigeración de un motor de combustión interna

Fuente: (El motor de combustión interna, 2019)  
Obtenido de <https://elmotordecombustion.blogspot.com>

<https://elmotordecombustion.blogspot.com/2019/11/sistema-de-refrigeracion-de-los-motores.html>

**Intercambiador Indirecto de placa, carcasa y tubo, espiral:** En este tipo de intercambiadores de calor, la energía térmica se transmite por medio de una pared que separa el fluido caliente del fluido frío. Existen varios tipos:



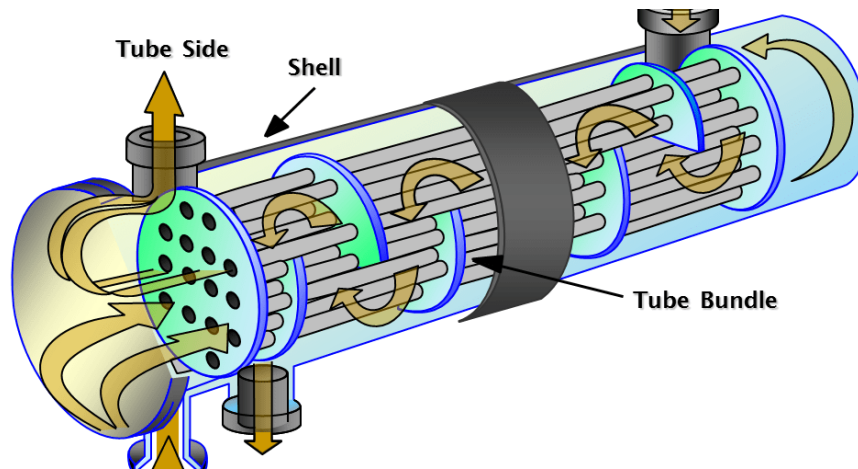


Ilustración 23 - Intercambiador indirecto de carcasa y tubo

Fuente: (Arveng training & engineering, 2020)

Obtenido de <https://arvengtraining.com/>

<https://arvengtraining.com/fundamentos-de-intercambiadores-de-ct/>

Un intercambiador de calor de carcasa y tubo es un dispositivo en el que dos fluidos, uno a través del lado tubos y el otro a través del lado de la carcasa, circulando en diferentes condiciones de temperatura, intercambian calor a través de las paredes de los tubos, sin contacto directo entre ellos. Tiene ventajas sobre otros intercambiadores a saber: i) Las presiones y las caídas de presión pueden variar en un amplio intervalo. ii) Hay una considerable flexibilidad en cuanto a los materiales de construcción para dar cabida a la corrosión y otras preocupaciones. iii) La limpieza y reparación son relativamente sencillas porque son fácilmente desmontables. La desventaja de este tipo de intercambiadores es su gran tamaño nada compacto.

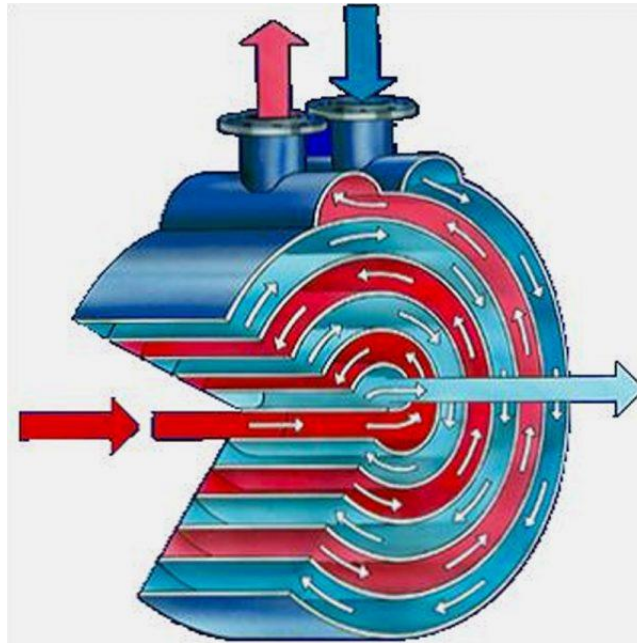


Ilustración 24 - Intercambiador indirecto en espiral

Fuente: (JNC J. Negre C., S.L., 2020) Obtenido de <https://jnegre.com>  
<https://jnegre.com/producto/intercambiador-en-esprial/>

El Intercambiador espiral es un intercambiador con dos canales estancos e independientes en espiral. El flujo de cada canal es en contracorriente respecto al otro canal, lo cual permite conseguir muy buenos acercamientos entre las temperaturas de cada circuito. El diseño de estos equipos tiene ventajas sobre otros intercambiadores como: i) Permite trabajar con fluidos sucios. ii) El paso de los fluidos es completamente libre. iii) Tiene dos puertas para acceso a cada circuito que permite la limpieza del sistema. La desventaja de este tipo de intercambiadores es su gran tamaño nada compacto.

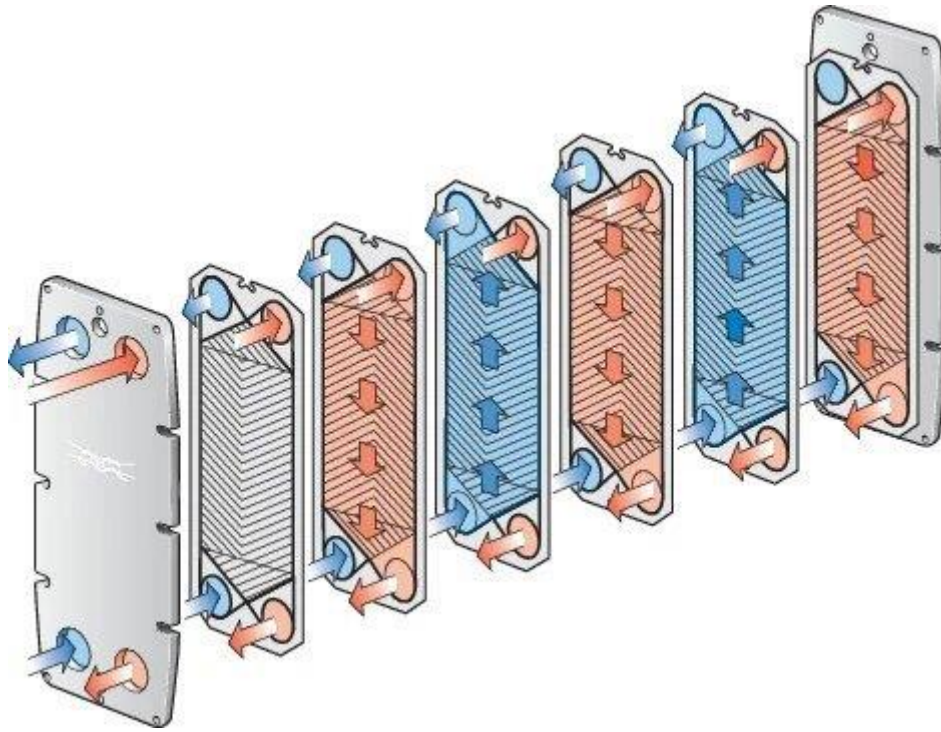


Ilustración 25 - Intercambiador indirecto de placas

Fuente: (alfalaval, 2020) Obtenido de <https://www.alfalaval.es/>

<https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferecia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones/>

En la mayoría de los casos, el tipo de placa es el intercambiador de calor más eficiente porque en general, ofrece la mejor solución a los problemas térmicos, brindando los límites más amplios de presión y temperatura. Con un intercambiador de calor tipo placa, el calor penetra en la superficie, lo que separa el medio caliente del frío con mucha facilidad. Por lo tanto, es posible calentar o enfriar fluidos o gases que tengan niveles de energía mínimos. La teoría de la transferencia de calor de un medio a otro, o de un fluido a otro, está determinada por varias reglas básicas: i) El calor siempre se transferirá de un medio caliente a un medio frío. ii) Siempre debe haber una diferencia de temperatura entre los

medios. iii) El calor perdido por el medio caliente es igual a la cantidad de calor ganado por el medio frío, excepto por las pérdidas a los alrededores.

En la ilustración 25 se muestra el principio de funcionamiento de un intercambiador de calor de placas con juntas de 1 paso para líquidos/líquidos, donde los fluidos corren contracorriente a través del intercambiador de calor. El líquido caliente (ilustrado en rojo) normalmente entra por una de las conexiones superiores y sale por la conexión inferior. El líquido frío (ilustrado en azul) entra por una de las conexiones inferiores y sale por la conexión de arriba. A medida que los fluidos pasan a través del intercambiador de calor, el calor se transfiere de los medios calientes a los medios fríos. El flujo de contracorriente permite las máximas posibilidades de recuperación de calor y se puede lograr una aproximación muy cercana a la temperatura (alfalaval, 2020).

El factor decisivo para la eficiencia energética del intercambiador de calor de placas es la eficiencia térmica que se expresa como la relación entre la energía térmica absorbida y la liberada, es decir, el porcentaje del calor que se transfiere realmente entre los dos medios. El 100% de transferencia solo es posible en teoría, porque en condiciones prácticas, los intercambiadores de calor siempre producen pequeñas pérdidas al medio ambiente.

En la mayoría de los casos, los intercambiadores de calor de placas son los más eficientes. Normalmente ofrecen la mejor solución a los problemas térmicos,

proporcionando los límites de presión y temperatura más amplios dentro de las restricciones de los equipos actuales (alfalaval, 2020).

### 3.2.2. Selección del tipo de intercambiador de calor

La compacidad es la relación entre la superficie de transferencia de calor y el volumen del intercambiador:

$$\beta = m^2/m^3 = A/V$$

Teniendo en cuenta que, una de las condiciones esenciales del equipo a construir es que sea portátil, es necesario que el intercambiador de calor sea de tipo compacto para que ocupe el menor espacio posible. Los intercambiadores de calor se consideran compactos cuando la relación entre la superficie de transferencia  $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  si al menos uno de los fluidos es gas (Durango Padilla, 2016, pág. 4).

La compacidad se puede aumentar de dos maneras: i) Disponiendo aletas en la superficie de transferencia de calor o, ii) Disminuyendo el diámetro hidráulico del flujo. Como el diámetro hidráulico está definido por:

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

Donde:

$D_h$  = diámetro hidráulico.

A = Area de la sección transversal del conducto.

P = Perímetro mojado del conducto

La tubería escogida para transportar el gas refrigerante es de geometría circular.

Para un tubo circular, el diámetro hidráulico queda:

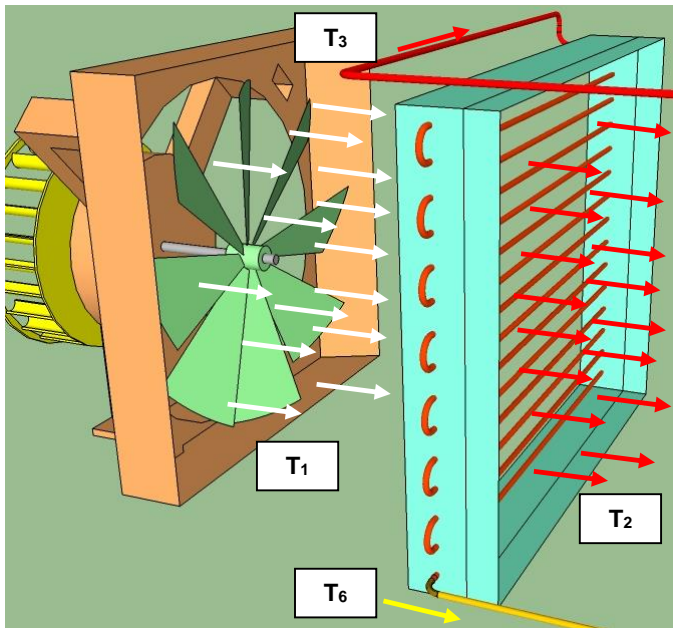
$$D_h = \frac{4 \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D$$

De tal manera que solo se puede aumentar la compacidad del intercambiador implementando aletas en la superficie de transferencia.

Así las cosas, se implementó un intercambiador de calor de tipo compacto porque se desea transferir energía térmica desde el fluido No 1, correspondiente al gas refrigerante R410A -el cual circula por el interior de la unidad condensadora-, hacia el fluido No. 2, correspondiente al volumen de aire que se utilizará posteriormente para generar las corrientes de viento.

El intercambiador de calor será de tipo indirecto, es decir, que la energía térmica contenida en el gas refrigerante se transferirá por conducción al volumen de aire a través de la pared metálica que conforma la tubería de serpentín (ver Ilustración 26). De esta manera no se presenta mezcla de los dos fluidos, ni fuga del gas refrigerante al exterior.

Como en este punto del diseño, la necesidad no está completamente acotada, se harán suposiciones y se verificarán en el proceso de obtener la solución, en otras palabras, el diseño se hizo acudiendo a un proceso iterativo:



Donde:

$T_1$  = Flujo de aire a temperatura ambiente, en °C.

$T_2$  = Flujo de aire a temperatura  $T_2$ , en °C.

$T_3$  = Temperatura de entrada del gas refrigerante al condensador, en °C.

$T_6$  = Temperatura de salida del líquido refrigerante del condensador, en °C.

Ilustración 26. Temperaturas de entrada y salida de los flujos en el Condensador

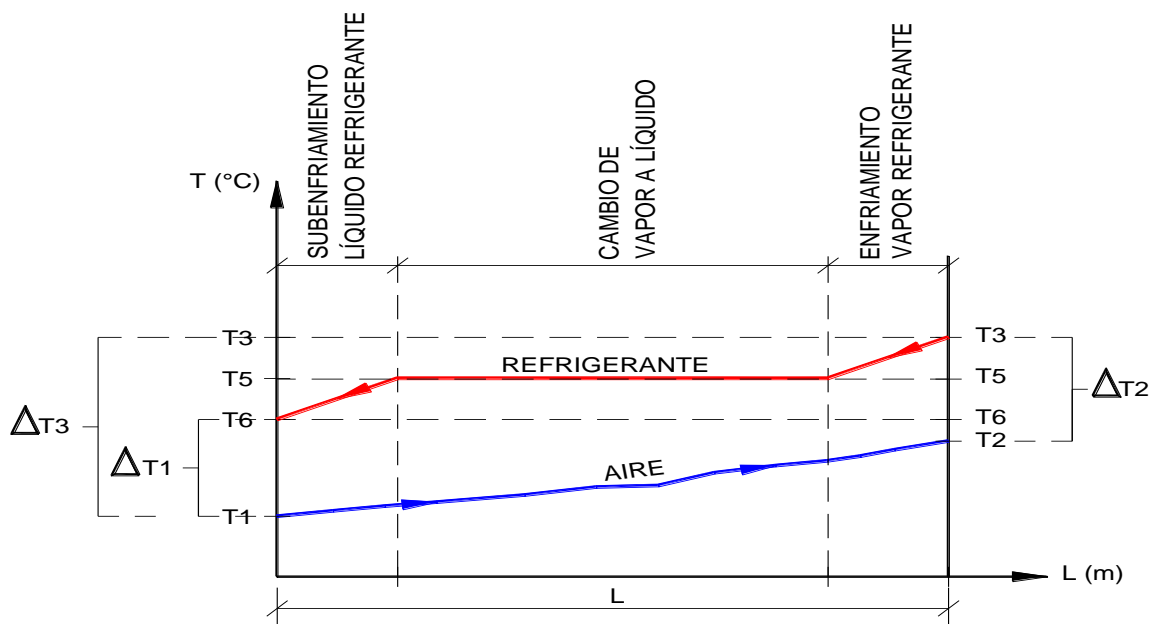


Ilustración 27. Comportamiento de la temperatura de los flujos que actúan en el Condensador

Donde:

$L$  = Longitud del serpentín, en metros.

$T_1$  = Temperatura del aire de entrada al condensador, en °C.

$T_2$  = Temperatura del aire de salida del condensador, en °C.

$T_3$  = Temperatura de entrada del gas refrigerante al condensador, en °C.

$T_5$  = Temperatura de condensación del refrigerante, en °C.

$T_6$  = Temperatura de subenfriamiento del refrigerante, en °C.

$\Delta T_1 = T_6 - T_1$ , en °C.

$\Delta T_2 = T_3 - T_2$ , en °C.

$\Delta T_3 = T_5 - T_1$ , Separación del Equipo, en °C.

### **SEPARACIÓN DEL CONDENSADOR**

Es un dato del equipo a utilizar, para equipos compactos la separación corresponde entre 15 y 17 °C.

Entonces tenemos que:

$$\Delta T_3 = (T_5 - T_1) = 17^\circ C \quad (1)$$

$T_1 = 19,6^\circ C$ , que corresponde a la temperatura ambiente (ver tabla No. 50 – Parámetros iniciales de la segunda operación del equipo).

Despejando  $T_5$  de la ecuación (1), tenemos:

$$T_5 = (17^\circ C - 19,6^\circ C) = 36,6^\circ C$$

$$T_5 = 36,6^\circ C$$



## TEMPERATURA DE CONDENSACIÓN

$$Q_c = \dot{m} * C_p(T_2 - T_1) \quad (2)$$

Donde:

$Q_c$  = Energía de condensación, en KJ/seg = KW.

$Q_c$  = Es la capacidad nominal del condensador = 1,465 KW.

$\dot{m}$  = Caudal másico del aire – fluido 2, en Kg/seg.

$C_p$  = Calor específico del aire – fluido 2 = 1,007 KJ/(Kg\*°C).

$T_1$  = Temperatura ambiente = 19,6°C.

$T_2$  = Temperatura de condensación.

## CAUDAL MÁSSICO DEL AIRE

$$\dot{m} = C_a * \rho_a \quad (3)$$

Donde:

$C_a$  = Caudal de aire – fluido 2, en m<sup>3</sup>/hora.

$C_a$  = 264,40 m<sup>3</sup>/hora (ver tabla No. 24, Velocidad y capacidad del aire en el túnel de viento).

$\rho_a$  = Densidad del aire a temperatura ambiente.

$\rho_a$  = 1,204 Kg/m<sup>3</sup>, a  $T_1$  = 19,6°C.

Reemplazando (3) en (2), nos queda:

$$Q_c = C_a * \rho_a * C_p(T_2 - T_1) \quad (4)$$

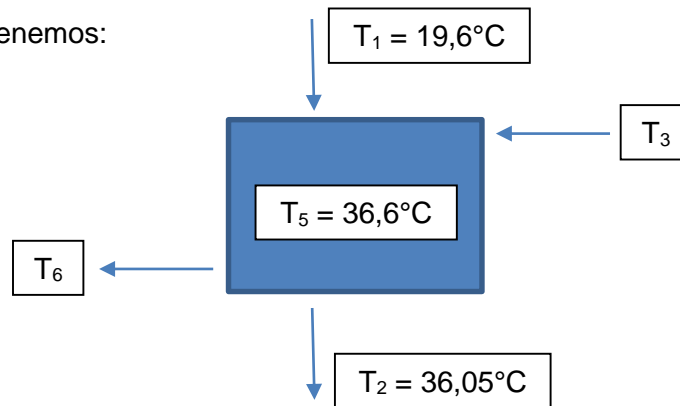
Entonces:

$$1,465 \frac{KJ}{s} * \frac{3.600 s}{1 hora} = 264,40 \frac{m^3}{hora} * 1,204 \frac{Kg}{m^3} * 1,007 \frac{KJ}{Kg * ^\circ C} (T_2 - 19,6^\circ C)$$

$$T_2 = \frac{5.274 + 6.283,09}{320,566}$$

$$T_2 = 36,05^\circ C$$

Entonces tenemos:



- Elemento condensante = Aire
- Temperatura de condensación =  $T_5 = 36,6^\circ C$
- Temperatura de entrada al condensador o descarga del compresor =  $T_3$  (ver tabla

No. 51 - Resultados de la segunda operación del sistema).

$$T_3 = \frac{63,8 + 65,7 + 64,9 + 64,1 + 64,7 + 65,3 + 65,7 + 65,8 + 65,9}{9}$$

$$T_3 = 65,1^\circ C$$

Caudal másico del aire:

$$\dot{m} = 264,40 \frac{m^3}{hora} * 1,204 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\dot{m} = 318,34 \frac{Kg}{m^3}$$

## SUPERFICIE DE INTERCAMBIO TÉRMICO

$$Q_C = U * A * \Delta_{TML} \quad (5)$$

Donde:

$Q_C$  = Es la capacidad nominal del condensador = 1.465 KW.

$U$  = Transmitancia global = 800 W/(m<sup>2</sup>\*°C) (Ver tabla No. 15 – Valores típicos de U).

$A$  = Superficie de intercambio, en m<sup>2</sup>.

$\Delta_{TML}$  = Diferencia media de temperatura logarítmica, en °C.

$$\Delta_{TML} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{Ln\left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}\right)} \quad (6)$$

Tabla 15. Valores típicos de U

|  | Convección libre, gases.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>2 - 5 | Convección libre, líquidos.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>10 - 100 | Convección forzada, gases.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>5 - 250 | Convección forzada, líquidos.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>50 - 1 E4 | Ebullición y Condensación<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>1 E3 - 5 E4 |
|--|---|---|---|--|--|
| Convección libre, gases.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>2 - 5          | 1 - 3   | 2 - 5   | 3 - 10  | 5 - 20   | 10 - 50  |
| Convección libre, líquidos.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>10 - 100    |   | 5 - 50  | 10 - 75   | 10 - 100   | 150 - 500  |
| Convección forzada, gases.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>5 - 250      |   |   | 5 - 100   | 20 - 250   | 20 - 250   |
| Convección forzada, líquidos.<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>50 - 1 E4 |   |   |   | 200 - 2500   | 500 - 4000   |
| Ebullición y Condensación<br>W/(m <sup>2</sup> .°C)<br>1 E3 - 5 E4   |   |   |   |  | 1000 - 6000  |

Fuente: (Durango Padilla, 2016, pág. 12)

$$\Delta_{T2} = T_3 - T_2 = 65,1^\circ\text{C} - 36,05^\circ\text{C}$$

$$\Delta_{T2} = 29,06^\circ\text{C}$$

$$\Delta_{T1} = T_6 - T_1 = 36,6^\circ\text{C} - 19,6^\circ\text{C}$$

$$\Delta_{T2} = 17^\circ\text{C}$$

Reemplazando en (6), tenemos:

$$\Delta_{TML} = \frac{29,06^\circ\text{C} - 17^\circ\text{C}}{\ln\left(\frac{29,06^\circ\text{C}}{17^\circ\text{C}}\right)}$$

$$\Delta_{TML} = 22,49^\circ\text{C}$$

Despejando A de la ecuación (5), nos queda:

$$A = \frac{Q_c}{U \cdot \Delta_{TML}} \quad (7)$$

$$A = \frac{1.465 \text{ W}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 22,49^\circ\text{C}}$$

$$A = 0,0814 \text{ m}^2$$

Una vez definida el área de la superficie de intercambio, se procedió a seleccionar el tipo de tubería a instalar. A ese respecto cabe señalar que, las tuberías de cobre son las que se utilizan de manera frecuente para líneas de refrigerante en sistemas de aire acondicionado por varias razones a saber:

- i) **Eficiencia energética:** La eficiencia energética del sistema podría mejorar mediante el uso de un mayor número de tuberías de aluminio, pero el peso del equipo sería muy alto y se incrementaría el volumen de refrigerante a utilizar, generando costos adicionales. La reducción del diámetro de la tubería que permite el uso de esta en material de cobre da como resultado una transferencia de calor más efectiva.

- ii) **Reducción en el uso de material:** El uso de tubería de cobre de diámetro menor, logra obtener un serpentín más pequeño y liviano con mayor eficiencia en la transferencia de calor, reduciendo a la vez el tamaño del intercambiador de calor.
- iii) **Reducción en el uso de gas refrigerante:** Tuberías de cobre de menos diámetro significa una reducción en volumen del gas refrigerante a utilizar para llenar el sistema, lo que significa menores costos de operación.
- iv) **Mayor durabilidad:** Otro beneficio adicional es que, frente a la humedad, el cobre tiene la facilidad de recubrirse o protegerse con una capa de óxido, que logra impedir ataques posteriores de dicha humedad, lo que garantiza una mayor durabilidad del sistema que estará expuesto a altas condiciones de humedad.
- v) **Eficiencia operacional:** Al utilizar el gas refrigerante R410A que es de tipo frigorígeno (ver numeral 3.1.6.3. Selección del gas refrigerante), donde la transferencia de calor se realiza por medio del cambio de estado del refrigerante de líquido a gas y viceversa, se requiere que esta transferencia de calor -absorber el calor latente a baja temperatura y presión para luego cederlo a alta temperatura y presión-, se haga dentro de unos mayores rangos de temperatura y presión posibles para lograr la mayor eficiencia. Al usar tubería de cobre de menor diámetro en el condensador se garantiza un mayor rango de presión y temperatura de trabajo.

Utilizando tubería de cobre de  $d=1/8''$ :

Diámetro exterior  $d_e = 3,18$  mm

Espesor de pared  $e = 0,41$  mm

Diámetro interior  $d_i = 2,36$  mm

Perímetro del tubo Pt:

$$Pt = 2 * \pi * \frac{di}{2} \quad (8)$$

$$Pt = 2 * \pi * \frac{2,36mm}{2}$$

$$Pt = 7,414 mm$$

Longitud de tubería condensador:

$$Lt = \frac{A}{Pt} \quad (9)$$

$$Lt = \frac{0,0814 m^2}{7,414 mm}$$

$$Lt = 10,98 m$$

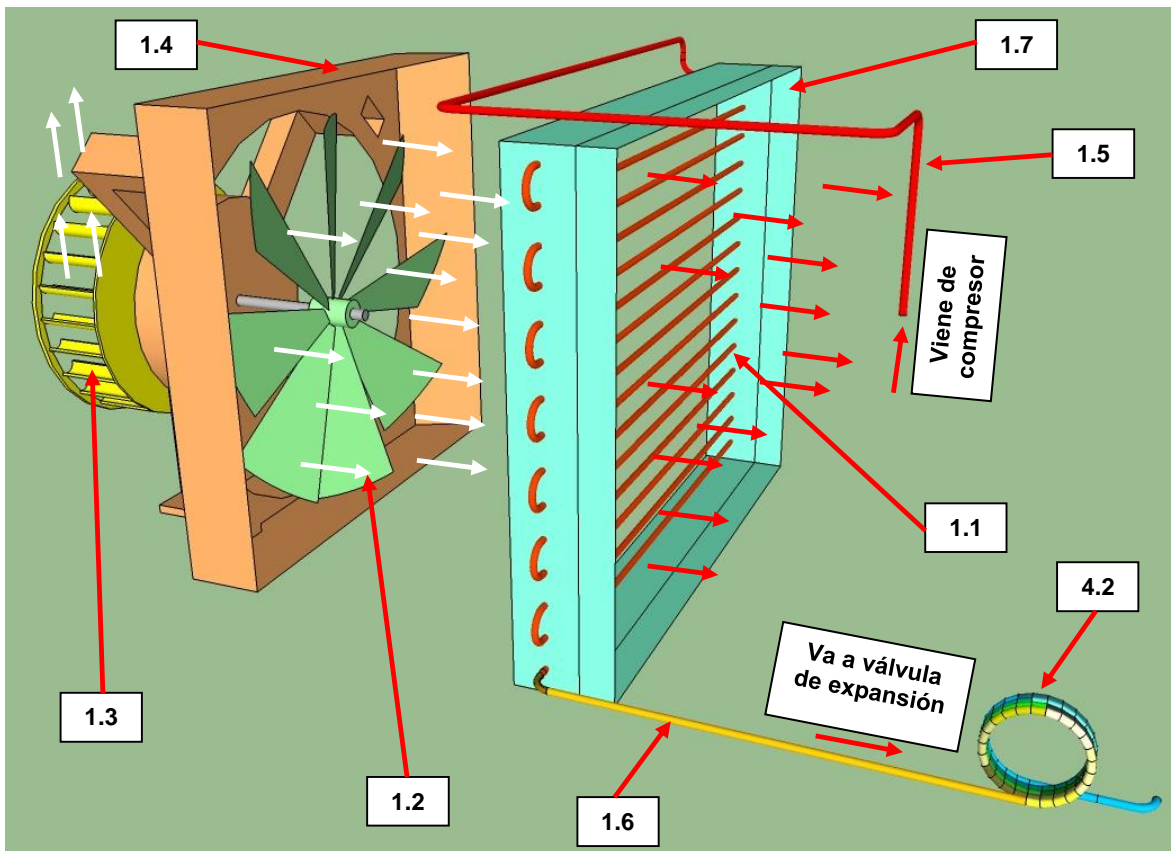


Ilustración 28. Despiece y funcionamiento de la unidad Condensadora

Tabla 16. Componentes de la unidad condensadora

| No. | COMPONENTE               | OBSERVACIONES                        |
|-----|--------------------------|--------------------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA      | Ver descripción en numeral 3.2       |
| 1.1 | SERPENTÍN                | Ver descripción en numeral 3.2.4.1   |
| 1.2 | VENTILADOR AXIAL         | Ver descripción en numeral 3.2.4.2.1 |
| 1.3 | VENTILADOR CENTRÍFUGO    | Ver descripción en numeral 3.2.4.2.2 |
| 1.4 | CHASIS VENTILADORES      |                                      |
| 1.5 | CONDUCTO DE GAS CALIENTE | Ver descripción en numeral 3.6       |
| 1.6 | CONDUCTO DE GAS LÍQUIDO  | Ver descripción en numeral 3.5.2.2   |
| 1.7 | CHASIS SERPENTÍN         |                                      |
| 4.2 | VÁLVULA DE EXPANSIÓN     | Ver descripción en numeral 3.5.2.2   |

### 3.2.3. Función de la unidad condensadora

El Condensador cumple tres funciones específicas:

- ✚ Expulsar el calor latente que el gas refrigerante ha absorbido en la unidad evaporadora (ver detalle en el numeral 3.5), y así entregar líquido refrigerante enfriado con destino a la válvula de expansión (ver numeral 3.5.2.2).
  
- ✚ Expulsar el calor que el gas refrigerante ha adquirido en el proceso de compresión al que ha sido sometido por el **Módulo de compresión** (ver detalle en el numeral 3.6). Además, el módulo de compresión añade al gas una cantidad adicional de calor que es generado por su motor y que se estima en una tercera parte del calor absorbido por la unidad evaporadora (Wirz, 2008, pág. 36)

- ✚ Aprovechar el calor expulsado por el gas refrigerante para calentar y secar (remover humedad) la masa de aire que circula alrededor del condensador, la cual será utilizada en el proceso de evaporación del agua a tratar, proceso que será explicado en detalle más adelante (ver numeral 3.3).

### 3.2.4. Componentes de la unidad condensadora

#### 3.2.4.1. Serpentin



Ilustración 29. Serpentin del Condensador



Está formado por una serie de tubos de cobre, a través de los cuales circula el gas refrigerante forzado a pasar por entre los tubos, y al estar en contacto con la superficie del serpentín, el gas transfiere energía al serpentín y en este proceso se enfría. La cantidad de calor transferido al serpentín y el factor de desvío (FD) son función de la superficie del serpentín o superficie de transferencia y de la velocidad del aire que circula alrededor de él; es decir, es función del tiempo que el aire esté en contacto con la superficie del serpentín al pasar a través de él. (climasmonterrey.com, 2018).

Para aumentar la superficie de transferencia y por tanto la compacidad del condensador, como se explicó en el numeral **3.2.2. Selección del tipo de intercambiador de calor**, se implementó aletas en la superficie de transferencia de calor de la tubería del serpentín, como se muestra en la ilustración 29. En este punto vale la pena mencionar que los condensadores de fabricación artesanal nacional disponen de muy pocas aletas con un bajo valor de compacidad. Se recurrió entonces a un condensador de fabricación industrial con gran número de aletas y alto valor de compacidad que cumple con los requerimientos energéticos del diseño planteado.

*Tabla 17. Especificaciones técnicas del serpentín del condensador*

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SERPENTÍN</b> |                         |                          |
|--|-------------------------|--------------------------|
| DIMENSIONES GENERALES                          | LONGITUD                | 36.5 cm                  |
|  | ALTURA                  | 29 cm                    |
|  | ESPEJOR                 | 3 cm                     |
|  | ÁREA ESPECÍFICA         | 1.058,50 cm <sup>2</sup> |
| DIMENSIONES TUBERÍA                            | LONGITUD TUBERÍA        | 1.095 cm                 |
|  | DIÁMETRO TUBERÍA        | 1/8"                     |
|  | MATERIAL TUBERÍA        | COBRE                    |
|  | MAX. PRESIÓN DE TRABAJO | 551 PSI                  |

### 3.2.4.2. Ventilador



Ilustración 30. Ventilador axial y ventilador centrífugo del Condensador

El equipo ventilador está conformado por dos ventiladores, uno de tipo centrífugo y otro de tipo axial. Los dos ventiladores están impulsados por un mismo motor.

### 3.2.4.2.1. Ventilador axial

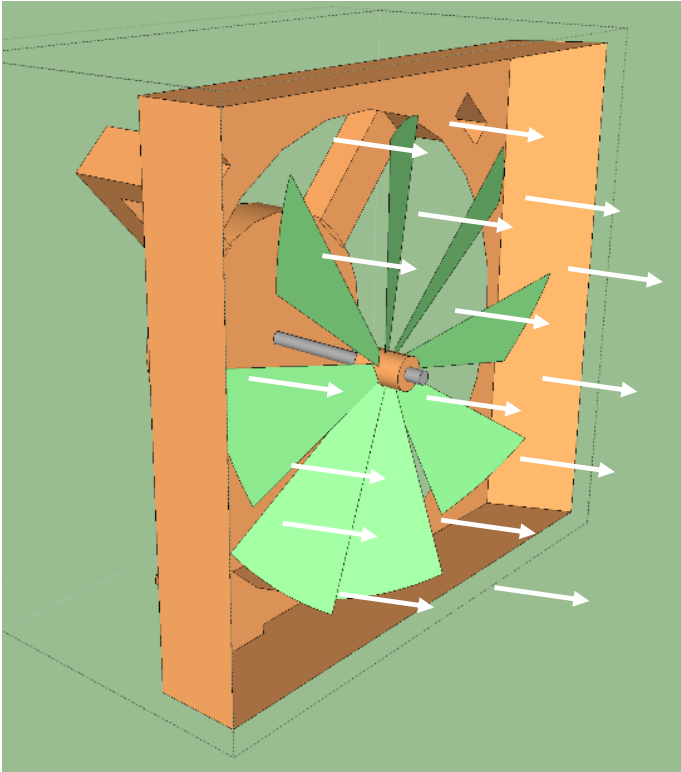


Ilustración 31. Funcionamiento del ventilador axial del Condensador

El ventilador de tipo axial posee seis aspas con curvatura cónica diseñadas para generar mayor impulsión de aire. El motor y las aspas están montados directamente sobre el eje y cuando giran generan una corriente de aire paralela al eje. Su función es enviar un flujo constante de aire perpendicular y a través del serpentín que recoja el calor producido por este último.

Tabla 18. Especificaciones técnicas del ventilador axial

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VENTILADOR AXIAL |                 |                        |
|--|-----------------|------------------------|
| DIMENSIONES GENERALES                          | DIÁMETRO        | 26 cm                  |
|  | NÚMERO DE ASPAS | 6 UNIDADES             |
|  | ÁREA ESPECÍFICA | 530,93 cm <sup>2</sup> |
| MOTOR ELÉCTRICO                                | CARGA           | 115 VOLTIOS            |
|  | FRECUENCIA      | 60 Hz                  |
|  | POTENCIA        | 21 W                   |
|  | VELOCIDAD       | 1090 rpm               |

### 3.2.4.2.2. Ventilador centrífugo

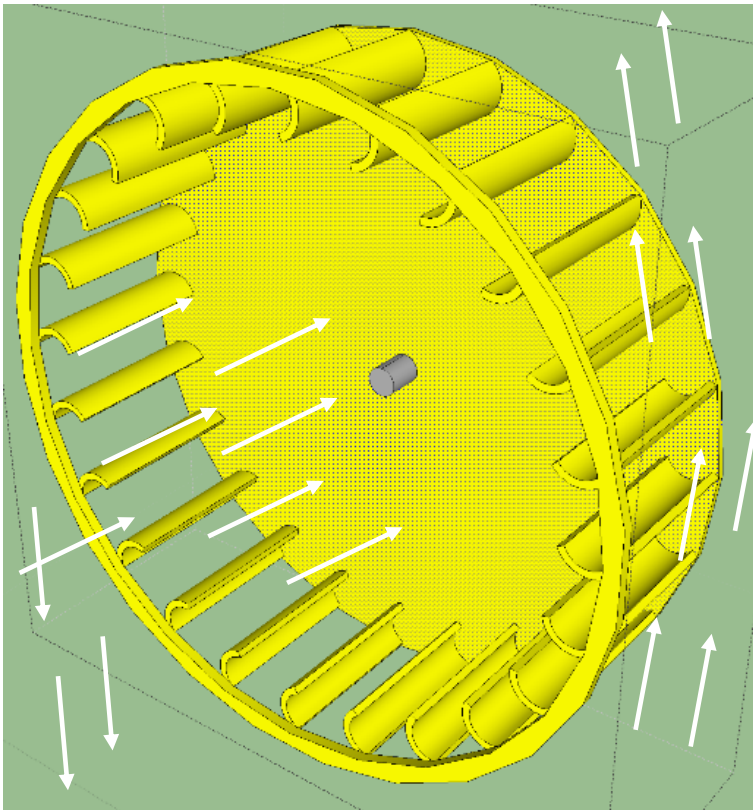


Ilustración 32. Funcionamiento del ventilador centrífugo del Condensador

El ventilador de tipo centrífugo posee una turbina que aspira aire por el centro y lo expulsa a través de sus álabes rectos. El aire entra al rodete de forma paralela a su eje y sale en dirección perpendicular al mismo, es decir en la dirección de un radio (S&P Sistemas de ventilación, 2018). Su función es enviar un flujo de aire a través de un túnel de viento que recoja el calor excedente

del serpentín y el calor producido por otros componentes del sistema, los cuales no hayan sido recogidos por el primer ventilador o ventilador axial.

Tabla 19. Especificaciones técnicas del ventilador centrífugo

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VENTILADOR CENTRÍFUGO |                    |                     |
|---|--------------------|---------------------|
| DIMENSIONES GENERALES                               | DIÁMETRO           | 18 cm               |
|   | ANCHO              | 5 cm                |
|   | NÚMERO DE ASPAS    | 59 UNIDADES         |
|   | ANCHO DE CADA ASPA | 1,6 cm              |
|   | ÁREA DE CADA ASPA  | 8 cm <sup>2</sup>   |
|   | ÁREA ESPECÍFICA    | 472 cm <sup>2</sup> |
| MOTOR ELÉCTRICO                                     | CARGA              | 115 VOLTIOS         |
|   | FRECUENCIA         | 60 Hz               |
|   | POTENCIA           | 21 W                |
|   | VELOCIDAD          | 1090 rpm            |

### 3.3. Túnel de viento

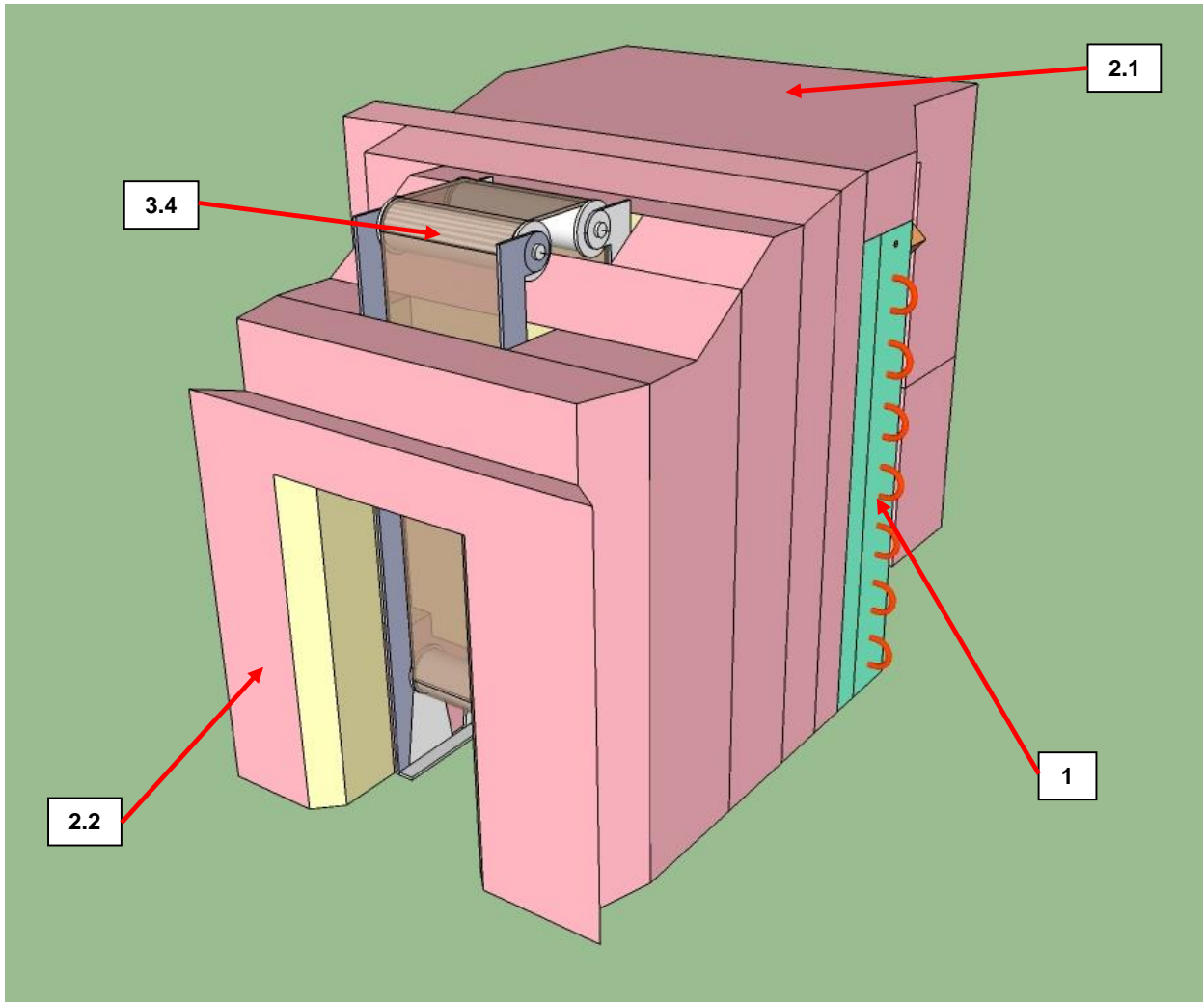


Ilustración 33. Conjunto túnel de viento - Vista frontal

Tabla 20. Componentes del conjunto túnel de viento

| No. | COMPONENTE                         | OBSERVACIONES                      |
|-----|------------------------------------|------------------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA                | Ver descripción en numeral 3.2     |
| 2   | TÚNEL DE VIENTO                    | Ver descripción en numeral 3.3     |
| 2.1 | TÚNEL DE VIENTO – ZONA CONDENSADOR | Ver descripción en numeral 3.3.1   |
| 2.2 | TÚNEL DE VIENTO – ZONA EVAPORADOR  | Ver descripción en numeral 3.3.1   |
| 3.4 | BANDA ABSORBENTE                   | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |



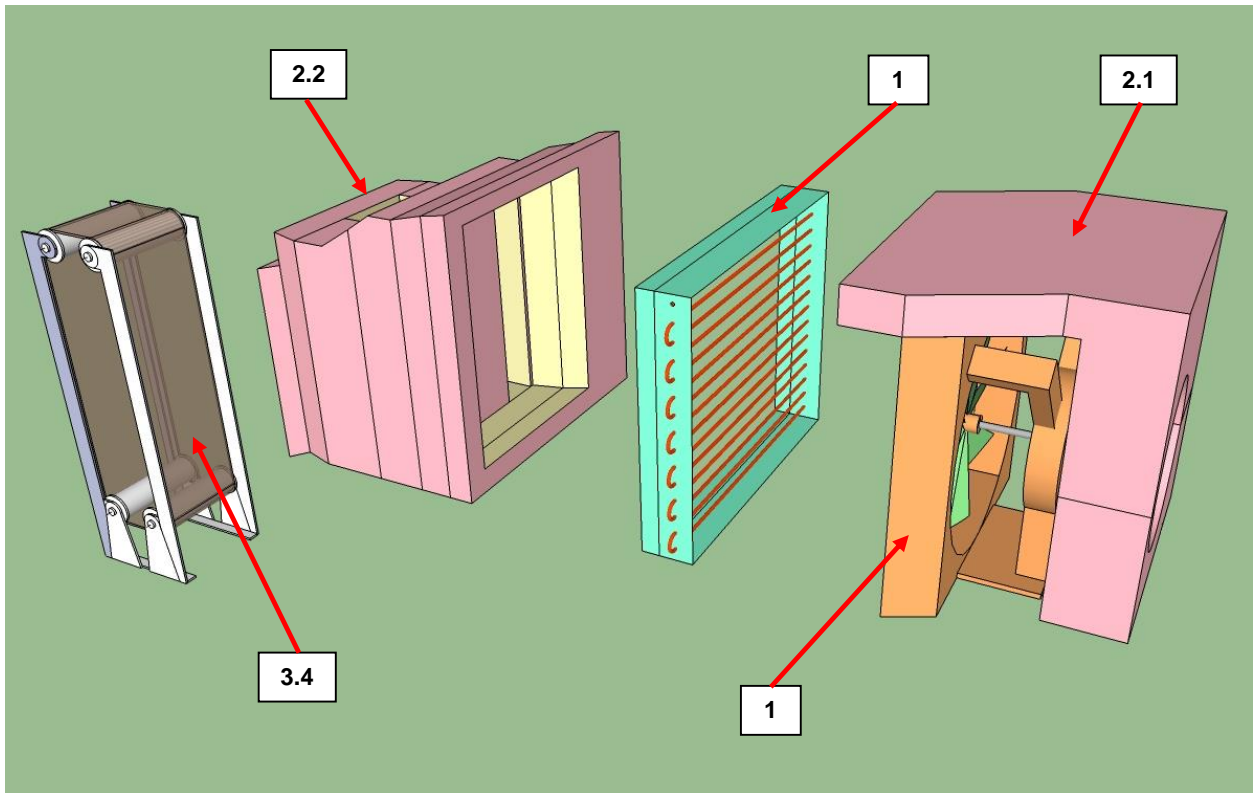


Ilustración 34. Despiece túnel de viento

Tabla 21. Despiece túnel de viento

| No. | COMPONENTE                         | OBSERVACIONES                      |
|-----|------------------------------------|------------------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA                | Ver descripción en numeral 3.2     |
| 2   | TÚNEL DE VIENTO                    | Ver descripción en numeral 3.3     |
| 2.1 | TÚNEL DE VIENTO – ZONA CONDENSADOR | Ver descripción en numeral 3.3.1   |
| 2.2 | TÚNEL DE VIENTO – ZONA EVAPORADOR  | Ver descripción en numeral 3.3.1   |
| 3.4 | BANDA ABSORBENTE                   | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |

### 3.3.1. Función del túnel de viento

El túnel de viento tiene dos funciones específicas:

- ✚ Recoger las dos corrientes de aire caliente y seco, impulsadas tanto por el ventilador axial como por el ventilador centrífugo. Su diseño especial permite integrar las dos corrientes de aire caliente en un solo flujo central cuyo vector de

dirección es perpendicular a la superficie absorbente que hace parte del equipo dosificador de agua cruda.

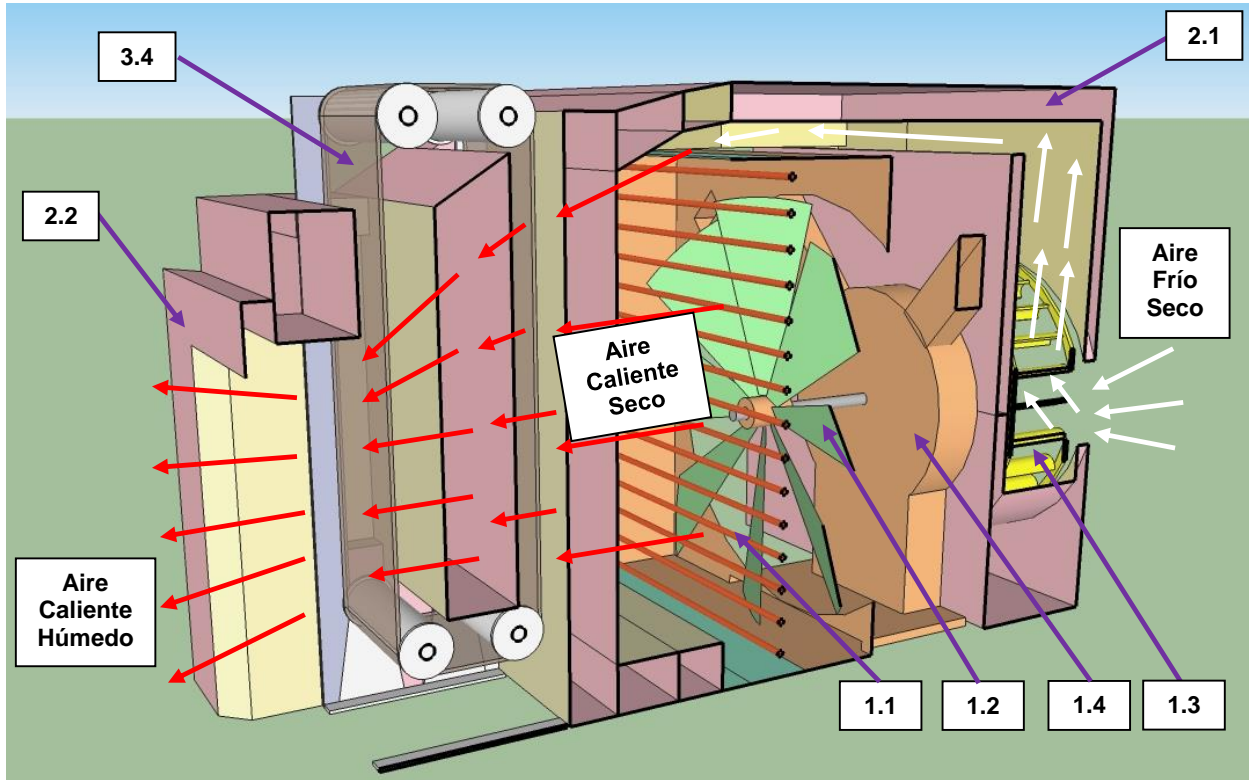


Ilustración 35. Funcionamiento del túnel de viento

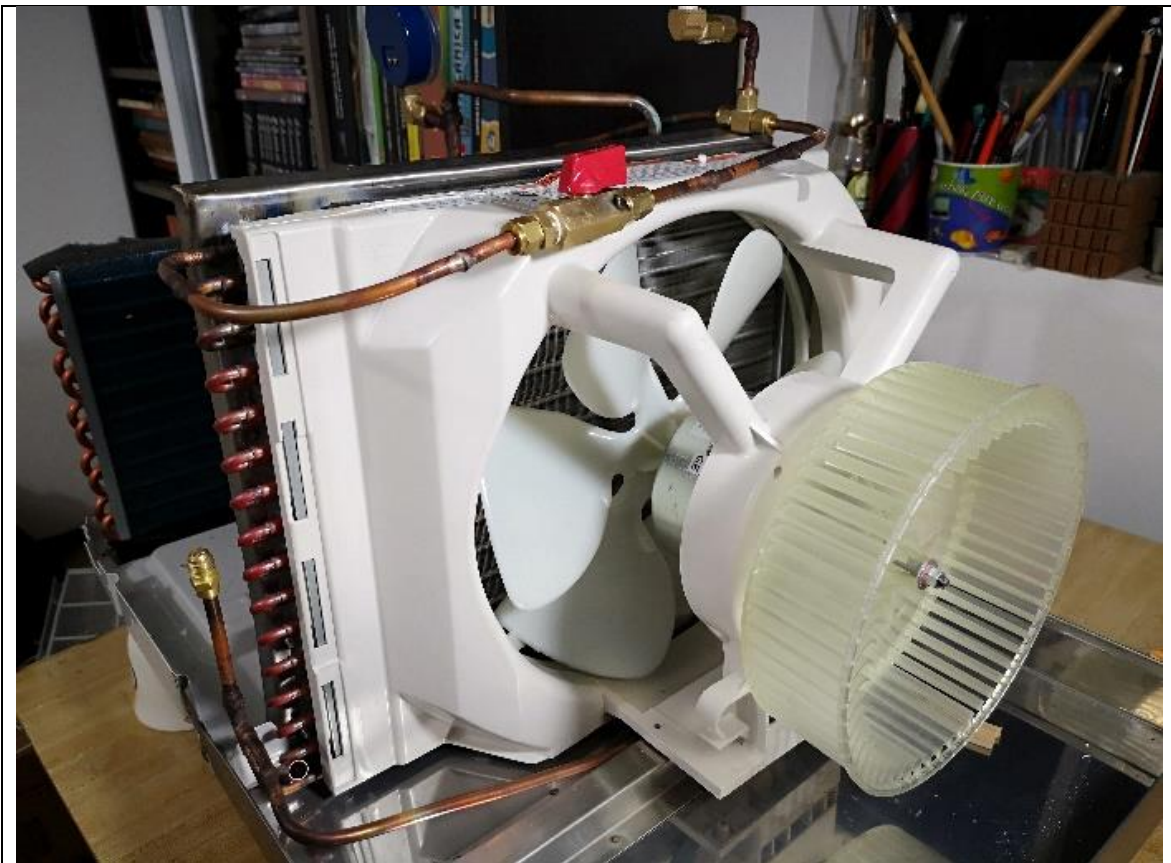
Tabla 22. Partes que intervienen en el funcionamiento del túnel de viento

| No. | COMPONENTE                         | OBSERVACIONES                        |
|-----|------------------------------------|--------------------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA                | Ver descripción en numeral 3.2       |
| 1.1 | SERPENTÍN                          | Ver descripción en numeral 3.2.4.1   |
| 1.2 | VENTILADOR AXIAL                   | Ver descripción en numeral 3.2.4.2.1 |
| 1.3 | VENTILADOR CENTRÍFUGO              | Ver descripción en numeral 3.2.4.2.2 |
| 1.4 | CHASIS VENTILADORES                |                                      |
| 2   | TÚNEL DE VIENTO                    | Ver descripción en numeral 3.3       |
| 2.1 | TÚNEL DE VIENTO – ZONA CONDENSADOR | Ver descripción en numeral 3.3.1     |
| 2.2 | TÚNEL DE VIENTO – ZONA EVAPORADOR  | Ver descripción en numeral 3.3.1     |
| 3   | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA      | Ver despiece en numeral 3.4          |
| 3.4 | BANDA ABSORBENTE                   | Ver descripción en numeral 3.4.2.4   |

- ✚ Luego de hacer pasar el flujo de aire caliente y seco a través de la superficie absorbente (la cual se encuentra ya húmeda) con el fin de recoger la humedad, el túnel de viento dirige el flujo de aire caliente pero ahora húmedo hacia la unidad evaporadora, con un vector de dirección perpendicular a este último.

### 3.3.2. Modelación del túnel de viento

Partiendo de la geometría externa de la unidad condensadora se da inicio a la modelación del túnel de viento. Al tratarse de un equipo prototipo, se utilizó como material de modelación el poliestireno expandido, comúnmente conocido como “icopor” debido a su fácil manipulación, gran flexibilidad, bajo peso, resistencia mecánica y resistencia al agua.



*Ilustración 36. Modelación del túnel de viento – Unidad condensadora desnuda*



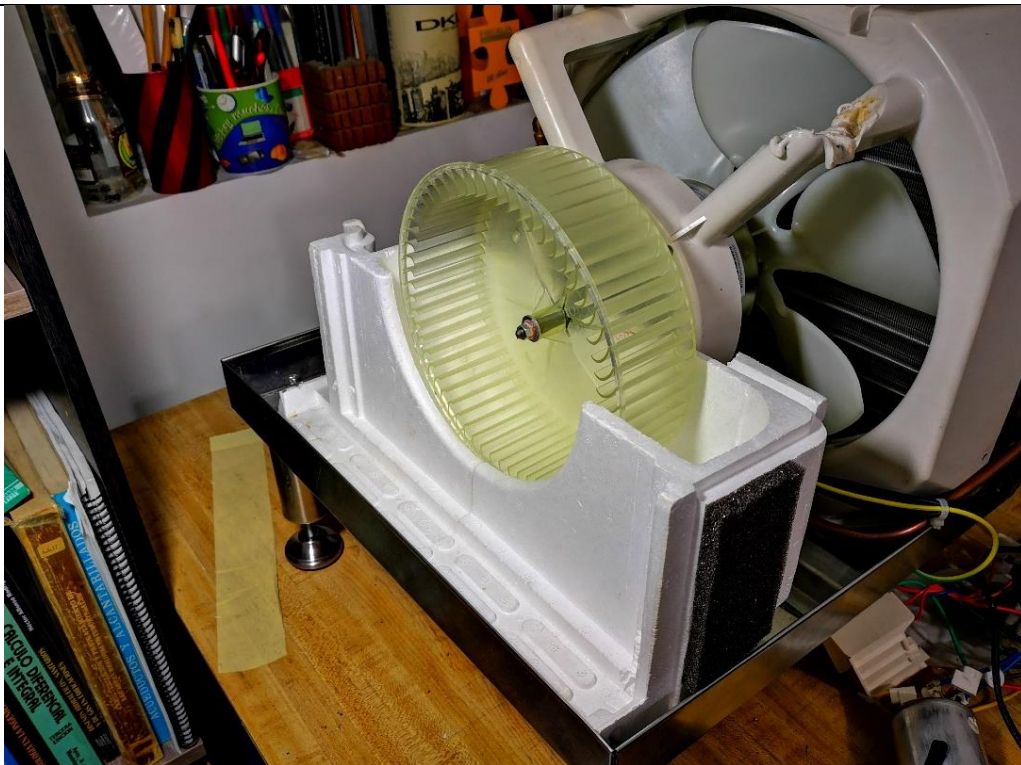


Ilustración 37. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de ventiladores de la Unidad Condensadora - Vista posterior

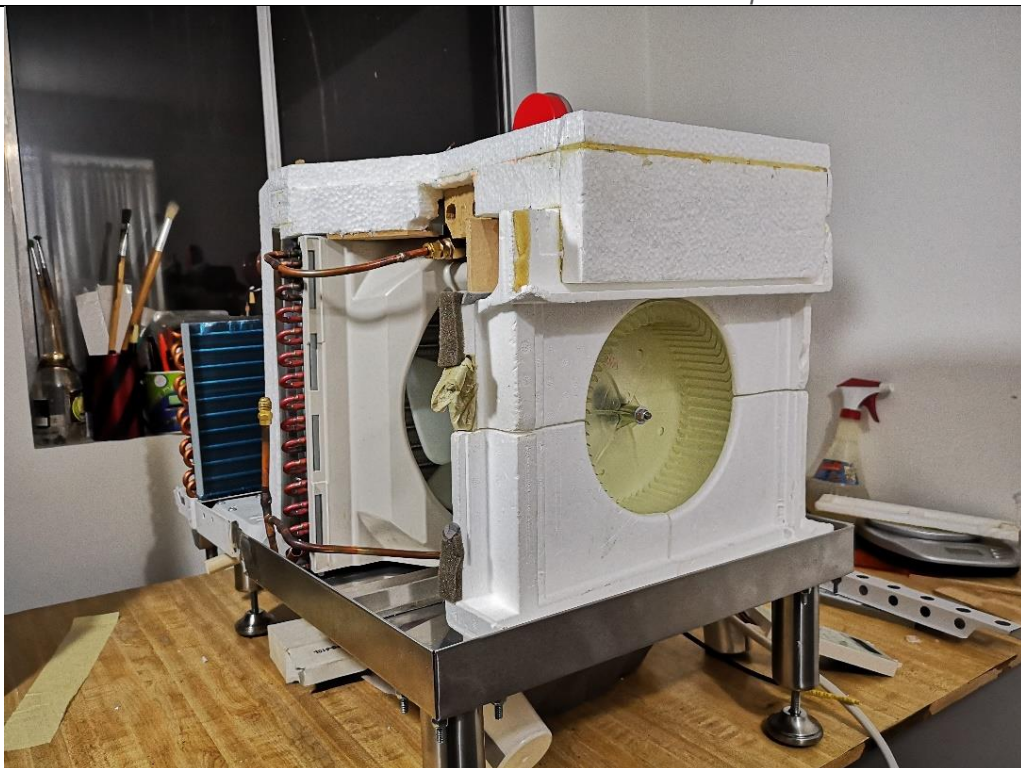
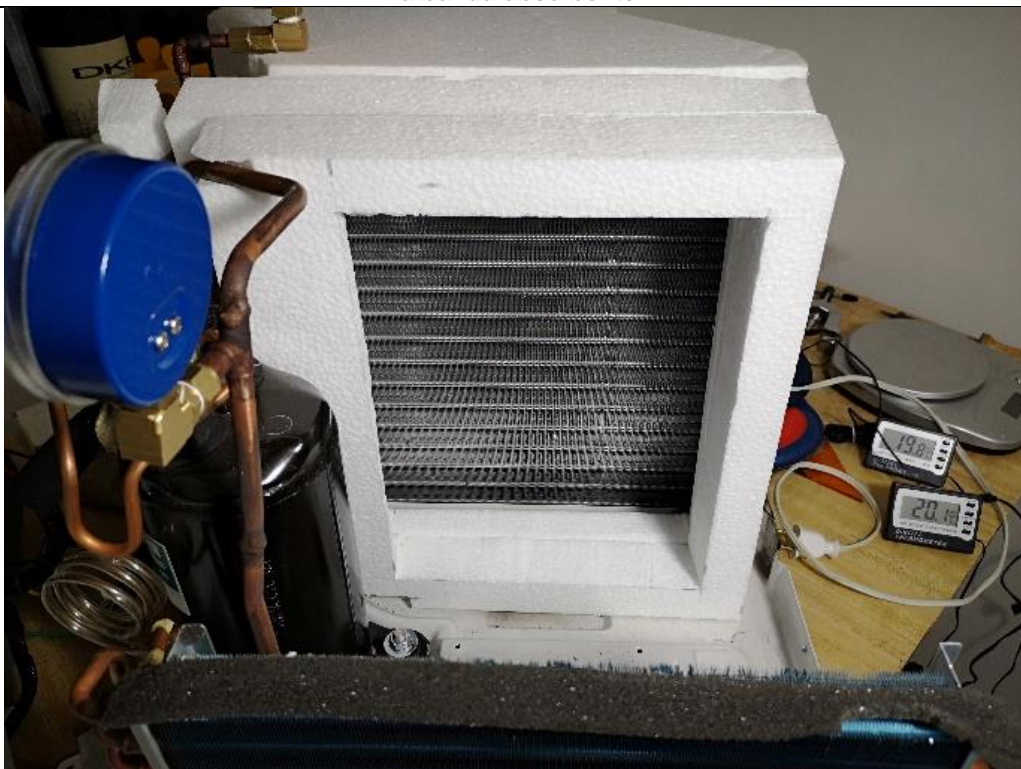


Ilustración 38. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de ventiladores de la Unidad Condensadora - Vista lateral



*Ilustración 39. Modelación del túnel de viento – Serpentín del condensador desnudo – Zona de la banda absorbente*

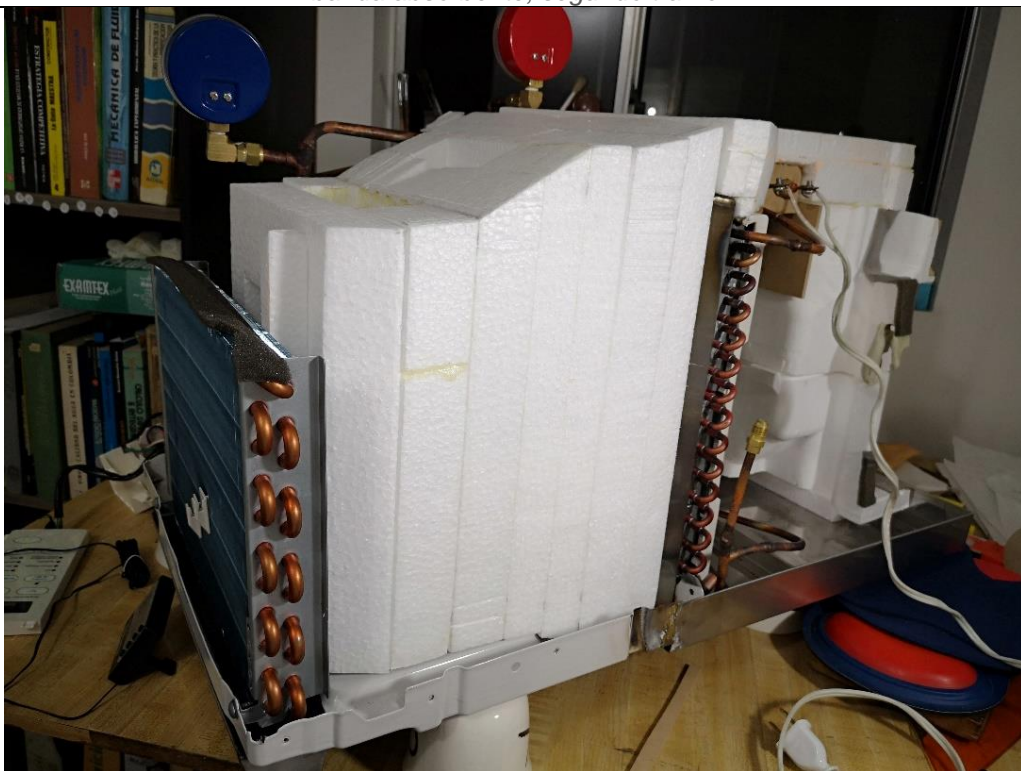


*Ilustración 40. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de la banda absorbente, primer tramo*





*Ilustración 41. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de la banda absorbente, segundo tramo*



*Ilustración 42. Modelación del túnel de viento con poliestireno expandido (EPS) – Zona de la banda absorbente, tercer tramo*

El poliestireno expandido ofrece además de las ventajas constructivas ya mencionadas, propiedades físicas necesarias para la operación del equipo como son la resistencia a la humedad, resistencia al envejecimiento, resistencia al calor y lo más importante, es un excelente aislante térmico que ayuda a que el equipo trabaje en las condiciones ideales de temperaturas operación sin que se vea afectado por las condiciones climáticas externas.

Una vez definida la geometría del túnel de viento, la cual fue determinada por la geometría de la unidad condensadora, así como por la disposición espacial de la banda absorbente y de la unidad evaporadora, se procedió al recubrimiento en razón a que, aun cuando el poliestireno expandido es resistente a la humedad, no lo es tanto al vapor, motivo por el cual fue necesario proveerlo de un recubrimiento exterior a base de vinilo acrílico, rematado posteriormente con una capa de barniz transparente de resina a base de agua.

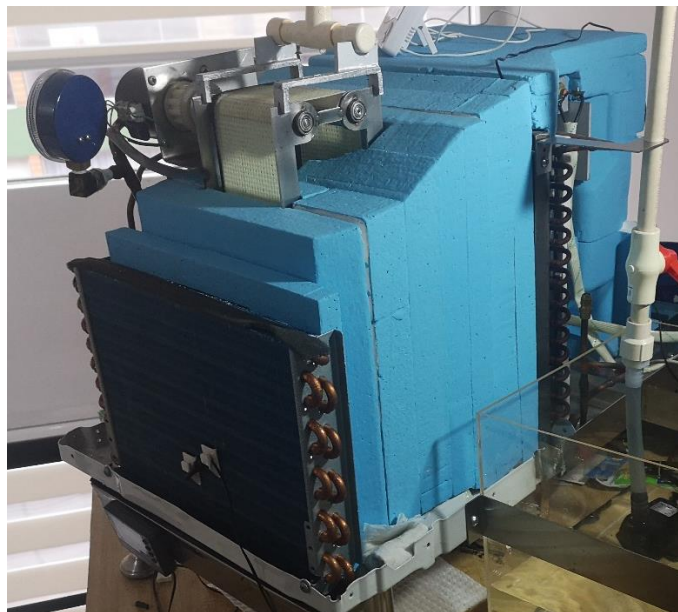





Ilustración 43 - Túnel de viento protegido por vinilo acrílico y barniz

### 3.3.3. Cálculo de capacidad del túnel de viento

Se obtuvo los valores de velocidad del viento producido por los dos ventiladores (axial y centrífugo, ver numerales 3.2.4.2.1 y 3.2.4.2.2) y encauzado en el túnel de viento, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 23. Velocidades medidas en el túnel de viento

| VELOCIDAD VENTILADORES (Selector) | VELOCIDAD ANEMÓMETRO (m/s) | OBSERVACIONES   |
|-----------------------------------|----------------------------|---|
| Alta                              | 3,3                        | Registrado con Anemómetro Digital R2 Modelo GM816<br>  |
| Media                             | 3,2                        | Registrado con Anemómetro Digital R2 Modelo GM816<br> |
| Baja                              | 3,0                        | Registrado con Anemómetro Digital R2 Modelo GM816<br> |

Las dimensiones de la sección transversal del túnel de viento en el sitio de interés, que para este caso corresponde a la localización de la banda absorbente del equipo dosificador de agua cruda (ver numeral 3.4.2.3), son las que se muestran a continuación:

Ancho sección: 0,107 m  
 Alto sección: 0,208 m  
 Área sección transversal:  $0,107\text{m} * 0,208\text{m} = 0,022256 \text{ m}^2$

La capacidad del túnel de viento será:

*Tabla 24. Velocidad y capacidad de aire en el túnel de viento*

| <b>SELECTOR DE VELOCIDAD</b> | <b>VELOCIDAD AIRE (m/s)</b> | <b>VELOCIDAD AIRE (m/h)</b> | <b>ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL (m<sup>2</sup>)</b> | <b>CAPACIDAD DEL TÚNEL DE AIRE (m<sup>3</sup>/h)</b> |
|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---|--|
| Alta                         | 3,3                         | 11.880                      | 0,022256  | 264,40   |
| Media                        | 3,2                         | 11.520                      | 0,022256  | 256,39   |
| Baja                         | 3,0                         | 10.800                      | 0,022256  | 240,36   |

### 3.4. Equipo dosificador de agua cruda

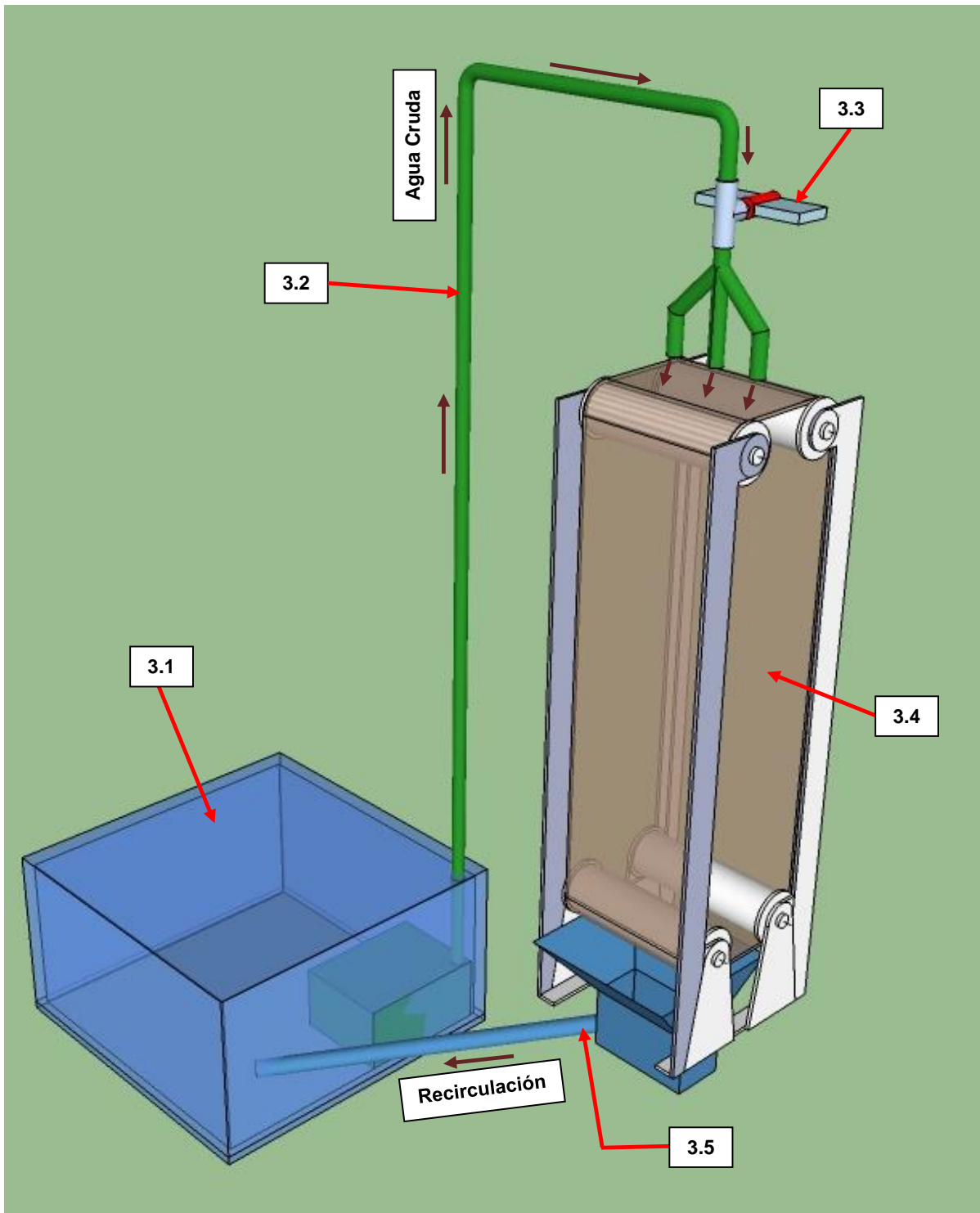


Ilustración 44. Equipo dosificador de agua cruda



Tabla 25. Componentes del equipo dosificador de agua cruda

| No. | COMPONENTE                                  | OBSERVACIONES                      |
|-----|---|------------------------------------|
| 3   | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA               | Ver despiece en numeral 3.4        |
| 3.1 | TANQUE DE BOMBEO INICIAL                    | Ver descripción en numeral 3.4.2.1 |
| 3.2 | BOMBEO INICIAL                              | Ver descripción en numeral 3.4.2.2 |
| 3.3 | DOSIFICADOR DE AGUA A SUPERFICIE ABSORBENTE | Ver descripción en numeral 3.4.2.3 |
| 3.4 | BANDA ABSORBENTE                            | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.5 | SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA            | Ver descripción en numeral 3.4.2.5 |

### 3.4.1. Función del equipo dosificador de agua cruda

El equipo dosificador de agua cruda bombea inicialmente el volumen de agua a tratar y lo distribuye uniformemente sobre una superficie absorbente que se ubica dentro del túnel de viento. Esta superficie absorbente retiene el agua a tratar y propicia el proceso de evaporación dentro del túnel de viento. El agua de exceso que no pudo ser evaporada sobre la superficie absorbente será recuperada y recirculada hacia el tanque de bombeo inicial para reiniciar el proceso.



### 3.4.2. Componentes del equipo dosificador de agua cruda

#### 3.4.2.1. Tanque de igualación

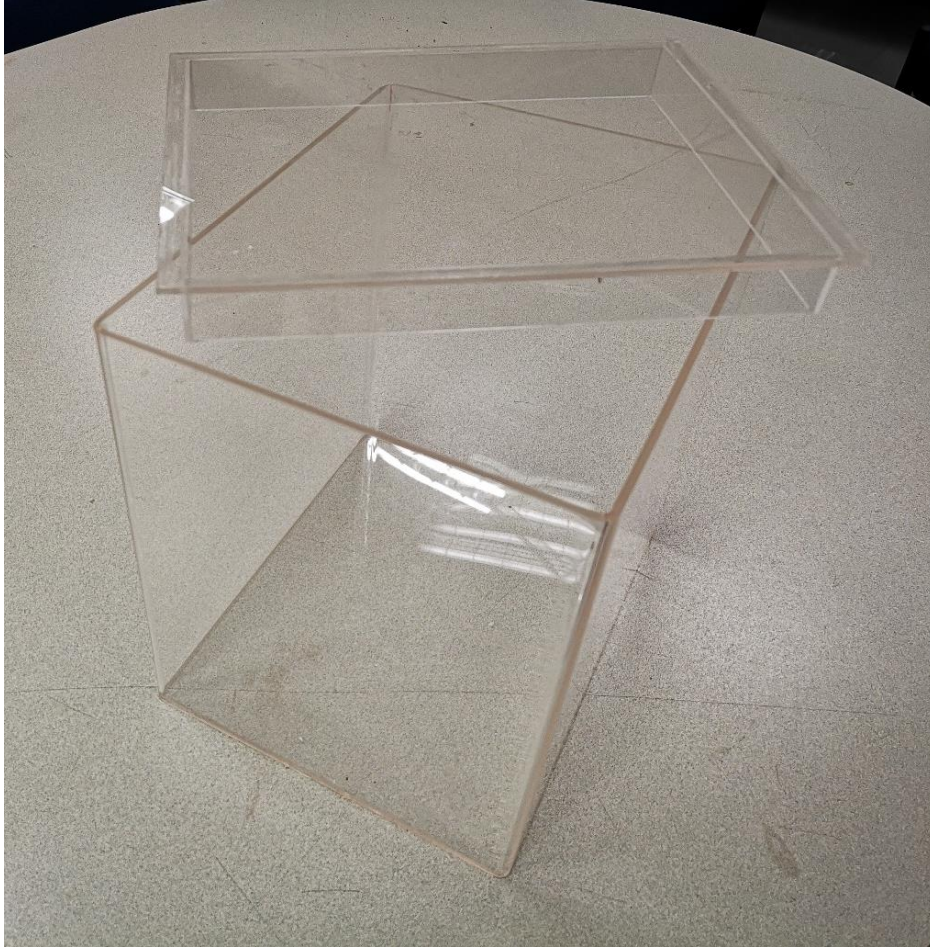


Ilustración 45. Tanque de igualación del conjunto dosificador de agua cruda

Tanque construido en acrílico diseñado para recibir el volumen de agua cruda al inicio del proceso de tratamiento. Cumple la función de igualación de caudal y de homogeneización de la calidad del agua cruda, además de recibir el caudal de agua de retorno o agua no procesada que no haya podido ser tratada en el primer ciclo de operación.

Es un depósito prismático diseñado para ofrecer disponibilidad continua de agua cruda que permita establecer un bombeo continuo y controlado hacia la superficie absorbente.

Tabla 26. Especificaciones técnicas del tanque de igualación

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TANQUE DE IGUALACIÓN |              |                        |
|--|--------------|------------------------|
| DIMENSIONES GENERALES                              | LARGO        | 25 cm                  |
|  | ANCHO        | 20 cm                  |
|  | ALTURA TOTAL | 24,5 cm                |
|  | ALTURA ÚTIL  | 22 cm                  |
|  | VOLUMEN ÚTIL | 11.000 cm <sup>3</sup> |
|  | MATERIAL     | ACRÍLICO TRANSPARENTE  |



El tanque aloja en su interior un hidrómetro construido en acrílico transparente, dispuesto para medir en tiempo real la densidad relativa y por extensión, la salinidad del agua cruda que entra al proceso de tratamiento.

Ilustración 46. Hidrómetro para medir salinidad del agua influente

### 3.4.2.2. Bombeo inicial



Ilustración 47. Bomba sumergible para bombeo inicial

Bomba sumergible fabricada en Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) DE ALTA DENSIDAD. Transporta el agua cruda desde el tanque de bombeo inicial hacia la superficie absorbente. El sistema de bombeo será ajustable en caudal para adaptarse a los parámetros de operación de todo el equipo.

Tabla 27. Especificaciones técnicas de la bomba sumergible

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BOMBA SUMERGIBLE |   |          |
|--|---|----------|
| ESPECIFICACIONES GENERALES                       | MODELO  | HJ-741   |
|  | TENSIÓN   | 110 V AC |
|  | FRECUENCIA  | 60 Hz    |
|  | POTENCIA  | 8 W      |
|  | ALTURA MÁXIMA   | 1,00 M   |
|  | CAUDAL MÁXIMO   | 600 L/H  |
| CURVA DE RENDIMIENTO                             | <p>The graph plots maximum head (H-max) in meters on the y-axis (0 to 2.5) against output in liters per hour (L/h) on the x-axis (0 to 1800). Six performance curves are shown, each labeled with a pump model: HJ-541 (blue), HJ-741 (red), HJ-941 (light blue), HJ-1141 (pink), HJ-1541 (purple), and HJ-1841 (dark blue). The curves show that as the output increases, the maximum head decreases for all models.</p> |          |

### 3.4.2.3. Dosificador de agua a superficie absorbente

Un sistema de boquillas ubicado al final de la línea de bombeo se encargará de distribuir uniformemente el agua a tratar sobre la superficie absorbente. El sistema está equipado con una válvula de control de flujo para administrar el caudal de agua que ingresa a la banda absorbente.

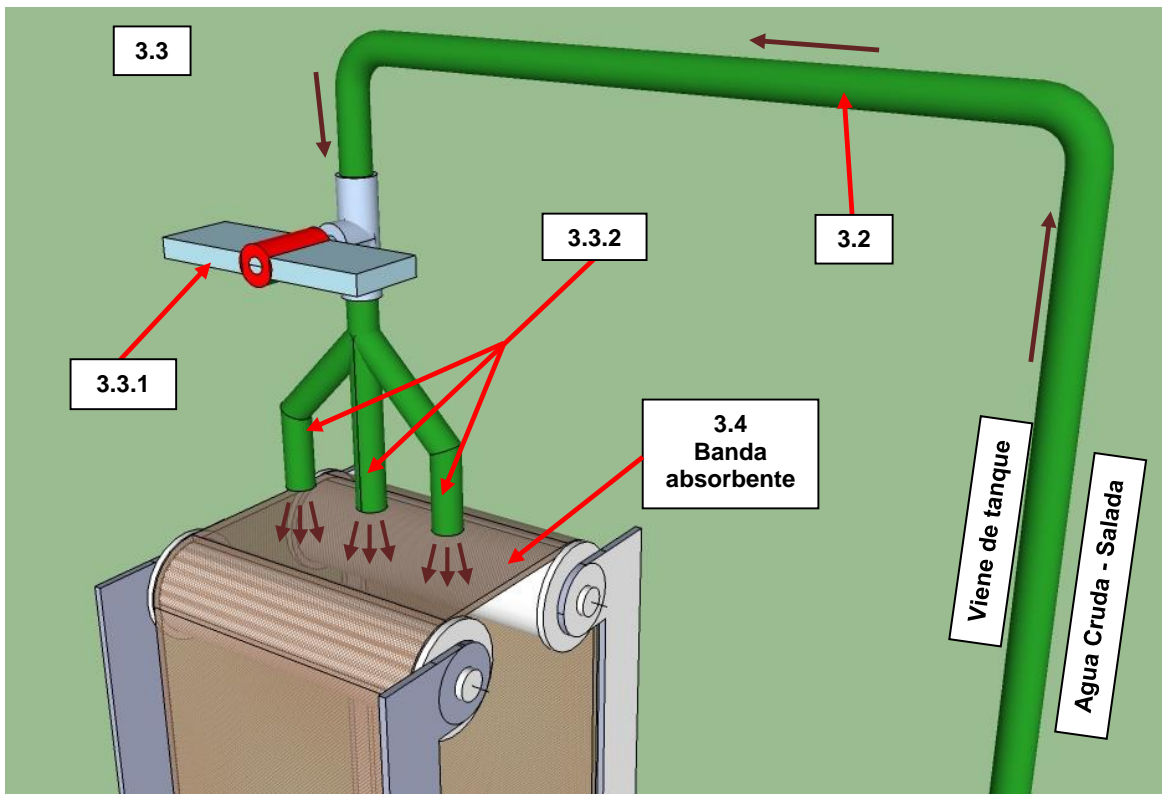


Ilustración 48. Boquillas dosificadoras de agua salada

Tabla 28. Componentes de las boquillas dosificadoras de agua cruda

| No.   | COMPONENTE                                  | OBSERVACIONES                      |
|-------|---|------------------------------------|
| 3     | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA               | Ver despiece en numeral 3.4        |
| 3.2   | BOMBEO INICIAL                              | Ver descripción en numeral 3.4.2.2 |
| 3.3   | DOSIFICADOR DE AGUA A SUPERFICIE ABSORBENTE | Ver descripción en numeral 3.4.2.3 |
| 3.3.1 | VÁLVULA DE CONTROL DE FLUJO                 | Ver descripción en numeral 3.4.2.3 |
| 3.3.2 | BOQUILLAS DOSIFICADORAS                     | Ver descripción en numeral 3.4.2.3 |
| 3.4   | BANDA ABSORBENTE                            | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |

Tabla 29. Especificaciones técnicas tubería dosificadora de agua cruda

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA TUBERÍA DOSIFICADORA DE AGUA</b> |                            |                   |
|---|----------------------------|-------------------|
| ESPECIFICACIONES<br>GENERALES                                       | DIÁMETRO TUBERÍA PRINCIPAL | 1/2"              |
|   | LONGITUD TUBERÍA PRINCIPAL | 1.0 M             |
|   | DIÁMETRO<br>DOSIFICADORAS  | BOQUILLAS<br>1/8" |



### 3.4.2.4. Banda absorbente

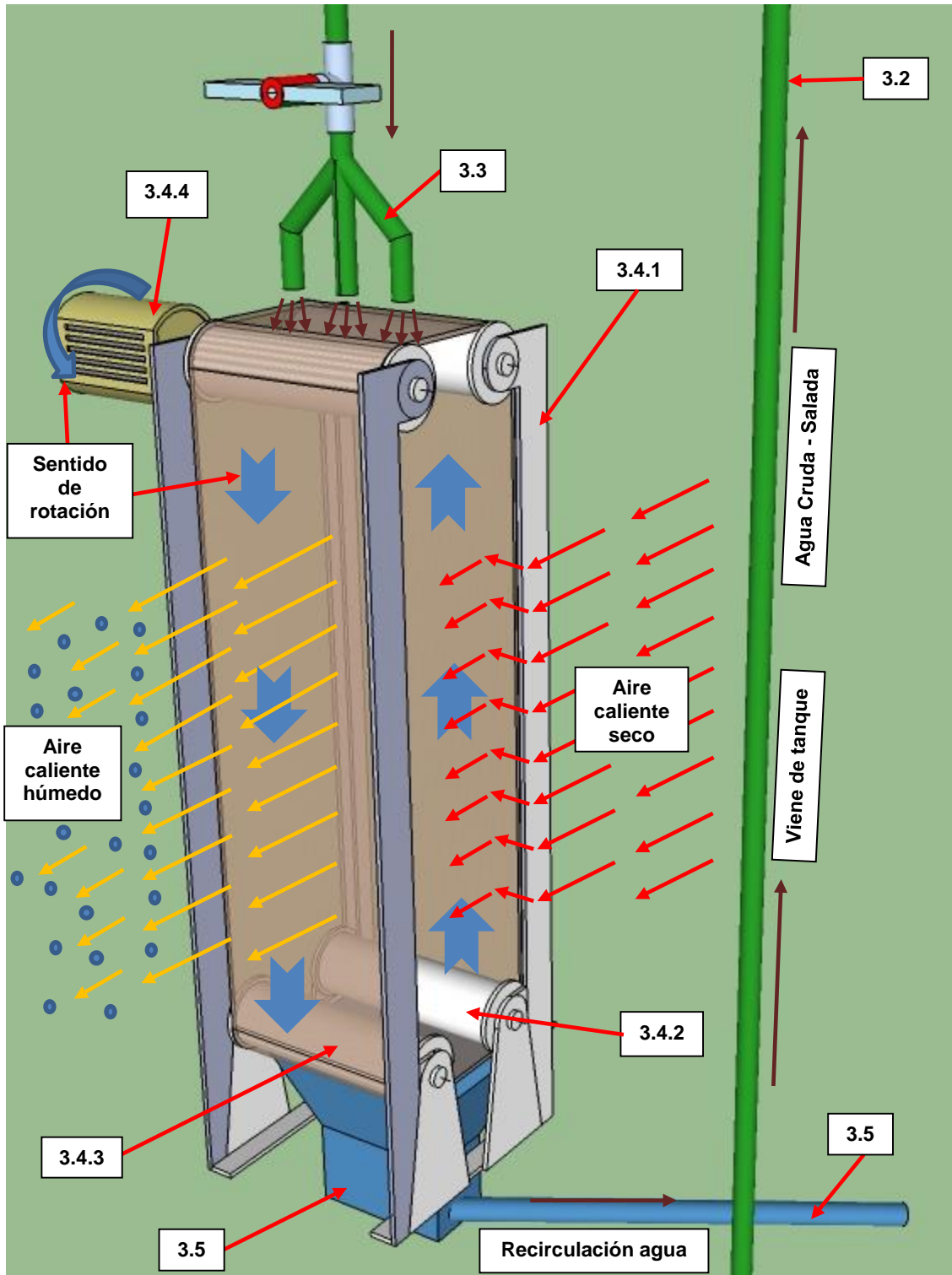


Ilustración 49. Banda absorbente

Tabla 30. Componentes del conjunto banda absorbente

| No.   | COMPONENTE                                  | OBSERVACIONES                      |
|-------|---|------------------------------------|
| 3     | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA               | Ver despiece en numeral 3.4        |
| 3.2   | BOMBEO INICIAL                              | Ver descripción en numeral 3.4.2.2 |
| 3.3   | DOSIFICADOR DE AGUA A SUPERFICIE ABSORBENTE | Ver descripción en numeral 3.4.2.3 |
| 3.4   | BANDA ABSORBENTE                            | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.4.1 | Chasis                                      | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.4.2 | Tambor giratorio                            | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.4.3 | Banda giratoria                             | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.4.4 | Motor eléctrico                             | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.5   | SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA            | Ver descripción en numeral 3.4.2.5 |

La superficie absorbente se trata de una banda tejida de poliéster y polycelulosa, cuya composición le concede la capacidad de retener altos volúmenes de agua, al mismo tiempo la forma de su tejido le permite el paso de las corrientes de aire a través de su estructura. La banda recibe de las boquillas dosificadoras el agua cruda; la función de las boquillas es humedecer gradualmente la banda. Un sistema de propulsión potenciado por un motor eléctrico se encarga de hacer rotar la banda absorbente sobre un conjunto de tambores, con el fin de distribuir uniformemente la humedad sobre toda la superficie de la banda y exponerla al flujo de aire caliente y seco que viene por el túnel de viento desde la unidad condensadora. En el intercambio presentado, el aire caliente y seco remueve la humedad presente en la banda absorbente.



Ilustración 50. Proceso de construcción del conjunto Banda absorbente – Cilindros giratorios y rodamientos de bolas en acero inoxidable



Ilustración 51. Proceso de construcción del conjunto Banda absorbente – Chasis de la banda en acero inoxidable – Sistema de tracción tipo araña en aluminio

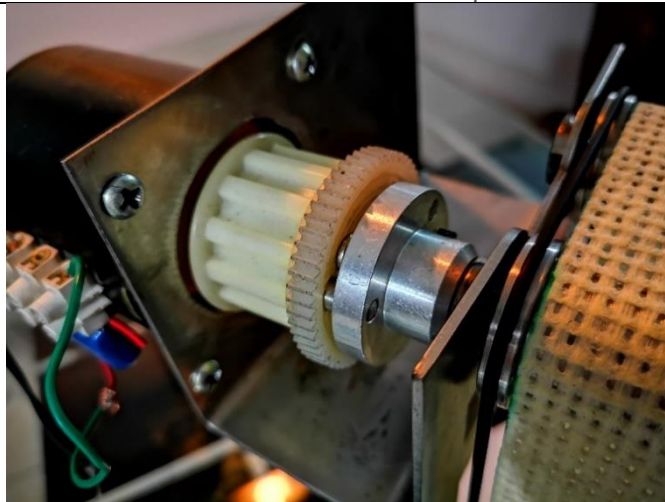


Ilustración 52. Proceso de construcción del conjunto Banda absorbente – Sistema de transmisión de potencia mediante correa de caucho – Acople del motor tipo araña en plástico de alta densidad



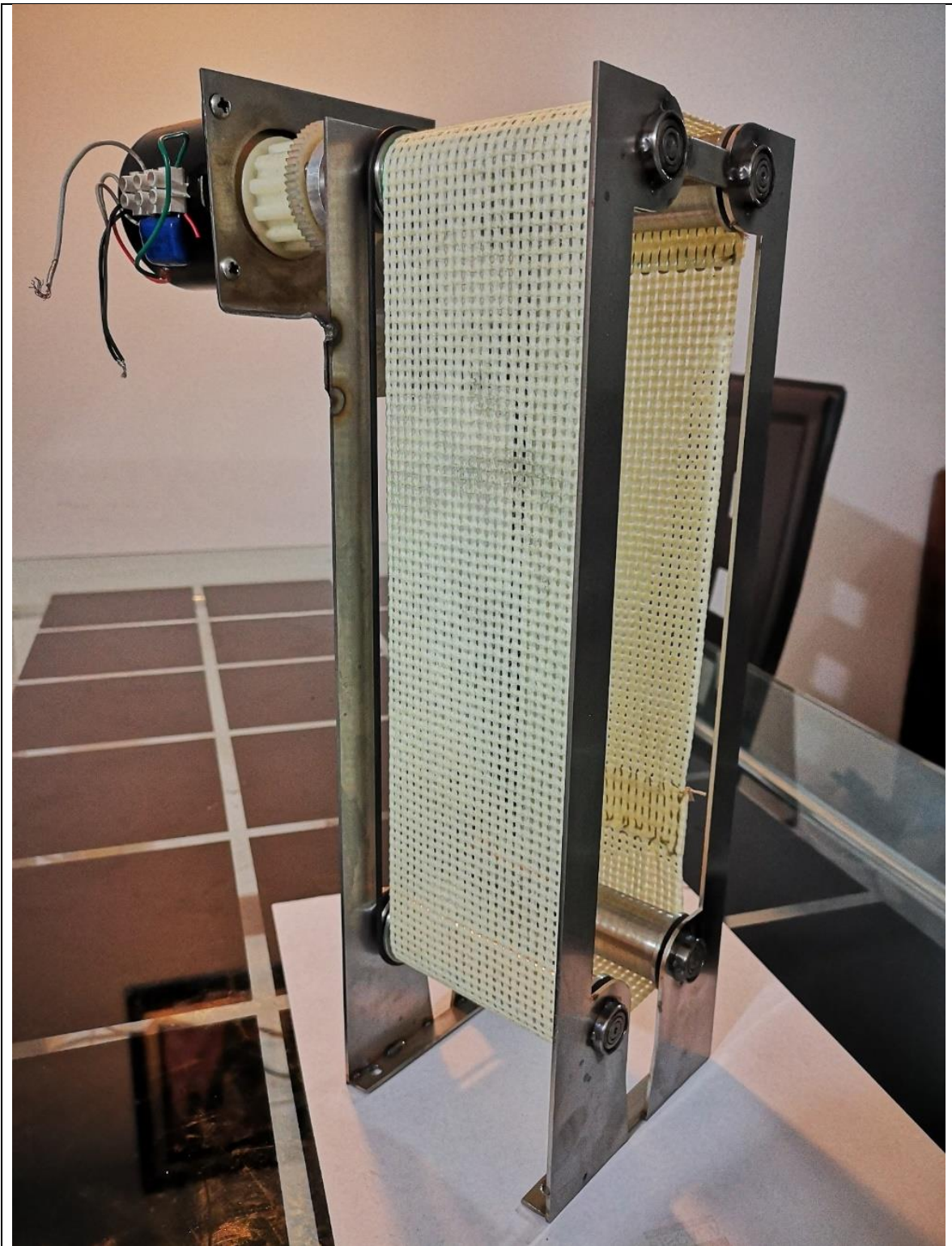


Ilustración 53. Conjunto Banda absorbente ensamblado – Motoreductor eléctrico – Banda absorbente tejida en poliéster y polycelulosa

Tabla 31. Especificaciones técnicas del conjunto banda absorbente

| <b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA BANDA ABSORBENTE</b> |                       |                        |
|---|-----------------------|------------------------|
| BANDA   | ANCHO DE BANDA        | 8,5 cm                 |
|   | LONGITUD DE BANDA     | 73,26 cm               |
|   | SUPERFICIE ESPECÍFICA | 622,71 cm <sup>2</sup> |
|   | MATERIAL              | POLIÉSTER POLYCELULOSA |
| RODILLOS  | DIÁMETRO              | 2,97 cm                |
|   | LONGITUD              | 9 cm                   |
|   | CANTIDAD              | 4 UNIDADES             |
|   | MATERIAL              | ACERO INOXIDABLE       |
| PLANTA MOTRÍZ   | TIPO                  | ELÉCTRICO              |
|   | TENSIÓN               | 110 V AC               |
|   | FRECUENCIA            | 60 Hz                  |
|   | POTENCIA              | 50 W                   |
|   | VELOCIDAD             | 10 RPM                 |
| CHASIS  | MATERIAL              | ACERO INOXIDABLE       |

#### 3.4.2.5. Sistema de recirculación de agua no procesada

El volumen de agua cruda que no logre ser evaporada por el flujo de aire caliente y seco en el primer ciclo de evaporación, escurrirá por gravedad hacia el fondo de la banda absorbente, donde un sistema de tolva recuperadora y tubería de recirculación se encargará de recogerla para llevarla hacia el tanque de bombeo inicial y reiniciar el proceso de dosificación de agua no procesada.

Tabla 32. Componentes del sistema de recuperación de agua no procesada

| <b>No.</b> | <b>COMPONENTE</b>                       | <b>OBSERVACIONES</b>               |
|------------|---|------------------------------------|
| 3          | EQUIPO DOSIFICADOR AGUA CRUDA           | Ver despiece en numeral 3.4        |
| 3.1        | TANQUE DE BOMBEO INICIAL                | Ver descripción en numeral 3.4.2.1 |
| 3.2        | BOMBEO INICIAL                          | Ver descripción en numeral 3.4.2.2 |
| 3.4        | BANDA ABSORBENTE                        | Ver descripción en numeral 3.4.2.4 |
| 3.5        | SISTEMA DE RECIRCULACIÓN DE AGUA        | Ver descripción en numeral 3.4.2.5 |
| 3.5.1      | Tolva recuperadora de agua salada       | Ver descripción en numeral 3.4.2.5 |
| 3.5.2      | Tubería de recirculación de agua salada | Ver descripción en numeral 3.4.2.5 |

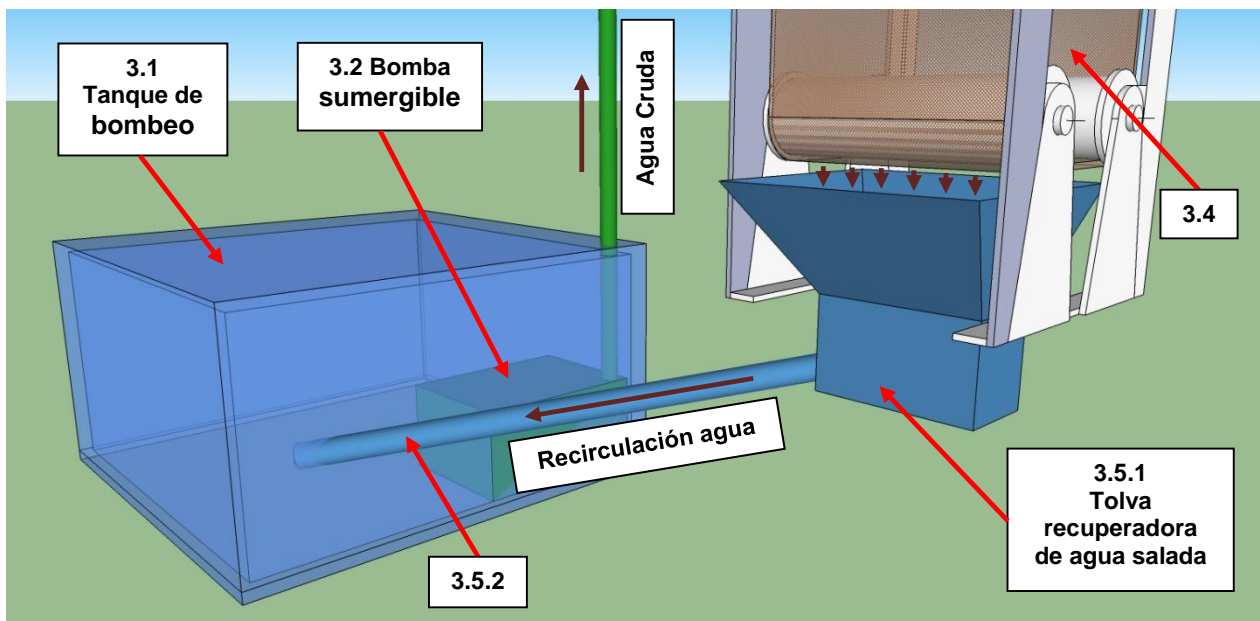


Ilustración 54. Sistema de recuperación de agua no procesada

Tabla 33. Especificaciones técnicas del sistema de recuperación de agua no procesada

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE AGUA NO PROCESADA |                   |                       |
|--|-------------------|-----------------------|
| TOLVA RECEPTORA  | ANCHO DE CORONA   | 8,0 cm                |
|  | LARGO DE CORONA   | 8,0 cm                |
|  | SUPERFICIE CORONA | 64,00 cm <sup>2</sup> |
|  | ALTURA DE TOLVA   | 7 cm                  |
|  | MATERIAL          | ACRÍLICO              |
| TUBERÍA DE RECIRCULACIÓN   | DIÁMETRO          | 1/2"                  |
|  | LONGITUD          | 15 cm                 |
|  | PENDIENTE         | 1 %                   |
|  | MATERIAL          | PVC                   |

## 3.5. Unidad evaporadora

### 3.5.1. Selección del tipo de intercambiador de calor

Como ya se mencionó en el numeral **3.2.1. Tipos de intercambiadores de calor**, en la mayoría de los casos, el tipo de placa es el intercambiador de calor más eficiente porque en general, ofrece la mejor solución a los problemas térmicos, brindando los límites más amplios de presión y temperatura. Con un intercambiador de calor tipo placa, el calor penetra en la superficie, lo que separa el medio caliente del frío con mucha facilidad.

El factor decisivo para la eficiencia energética del intercambiador de calor de placas es la eficiencia térmica que se expresa como la relación entre la energía térmica absorbida y la liberada, es decir, el porcentaje del calor que se transfiere realmente entre los dos medios. En la mayoría de los casos, los intercambiadores de calor de placas son los más eficientes. Normalmente ofrecen la mejor solución a los problemas térmicos, proporcionando los límites de presión y temperatura más amplios dentro de las restricciones de los equipos actuales (alfalaval, 2020).

La compacidad es la relación entre la superficie de transferencia de calor y el volumen del intercambiador:

$$\beta = m_2/m_3 = A/V$$

Teniendo en cuenta que, una de las condiciones esenciales del equipo a construir es que sea portátil, es necesario que el intercambiador de calor sea de tipo compacto para

que ocupe el menor espacio posible. Los intercambiadores de calor se consideran compactos cuando la relación entre la superficie de transferencia  $\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  si al menos uno de los fluidos es gas (Durango Padilla, 2016, pág. 4). La compacidad se puede aumentar de dos maneras: i) Disponiendo aletas en la superficie de transferencia de calor o, ii) Disminuyendo el diámetro hidráulico del flujo. Como el diámetro hidráulico está definido por:

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

Donde:

$D_h$  = diámetro hidráulico.

A = Area de la sección transversal del conducto.

P = Perímetro mojado del conducto

La tubería escogida para transportar el gas refrigerante es de geometría circular.

Para un tubo circular, el diámetro hidráulico queda:

$$D_h = \frac{4 \frac{\pi D^2}{4}}{\pi D} = D$$

De tal manera que solo se puede aumentar la compacidad del intercambiador implementando aletas en la superficie de transferencia.

Dicho esto, se implementó un intercambiador de calor de tipo compacto porque se desea transferir energía térmica desde el fluido No 2, correspondiente al volumen de aire caliente que viaja por el túnel de viento transportando la humedad -producto del proceso de evaporación sobre la banda absorbente- y que ataca de forma perpendicular el exterior de

la unidad evaporadora, hacia el fluido No. 1, correspondiente al refrigerante R410A que se desplaza por el interior de la unidad evaporadora.

El intercambiador de calor será de tipo indirecto, es decir, que la energía térmica contenida en la masa de aire caliente se transferirá por conducción al gas refrigerante a través de la pared metálica que conforma la tubería de serpentín (ver Ilustración 55). De esta manera no se presenta mezcla de los dos fluidos, ni fuga del gas refrigerante al exterior.

Como en este punto del diseño, la necesidad no está completamente acotada, se harán suposiciones y se verificarán en el proceso de obtener la solución, en otras palabras, el diseño se hizo acudiendo a un proceso iterativo:

### **RECALENTAMIENTO DEL EVAPORADOR**

El recalentamiento de la unidad evaporadora tiene que ver con el aumento de la temperatura que experimenta el refrigerante desde el mismo momento en que se evapora totalmente, hasta que llega al “módulo de compresión”. El refrigerante líquido empieza evaporarse dentro del módulo de evaporación a medida que se desplaza por el interior de la tubería del serpentín a una temperatura de 4,4 °C (característica del refrigerante R410A), y en ese proceso va disminuyendo el volumen de líquido hasta transformarse completamente en vapor saturado (ver Ilustración No. 56). Durante este proceso, el refrigerante absorbe calor latente.

## METODO PRESIÓN – TEMPERATURA

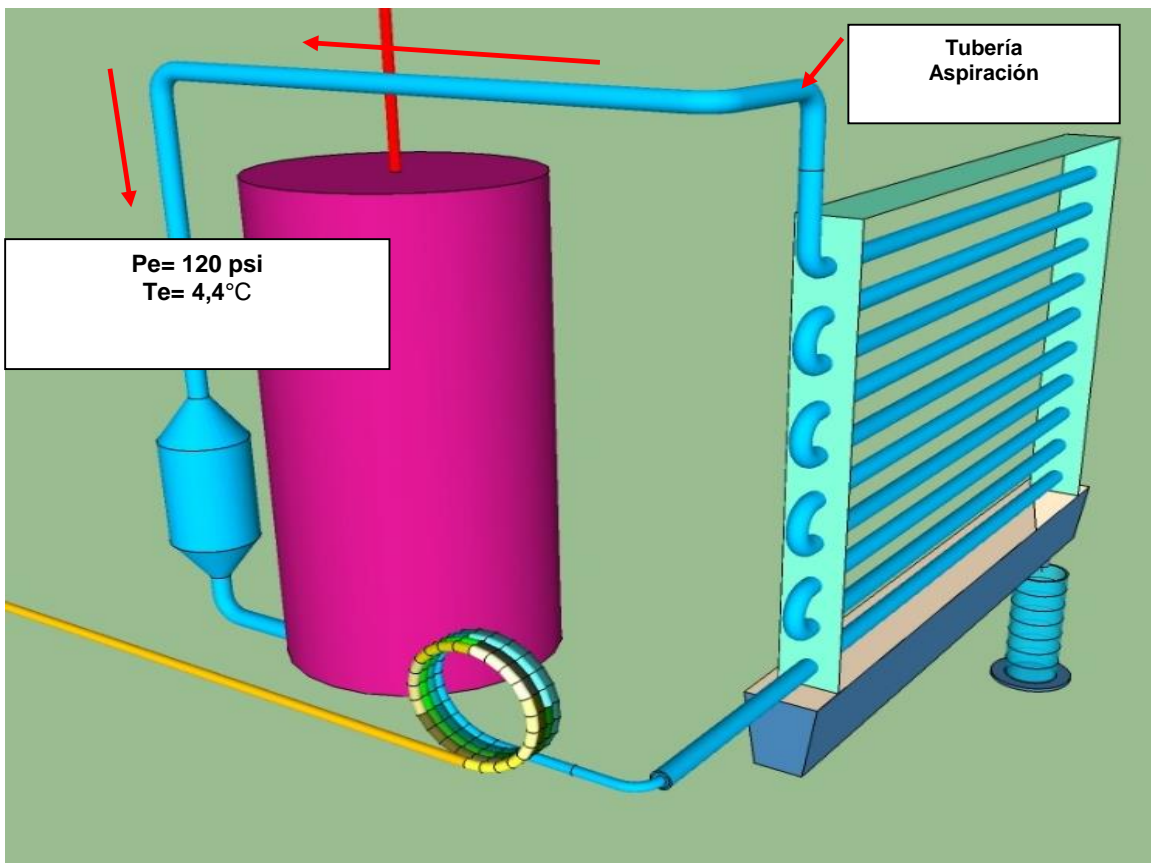


Ilustración 55. Presión y temperatura a la entrada del compresor

$P_e$  = Presión en la tubería de aspiración = presión en la entrada de la unidad de compresión  
= presión en la salida de la unidad de evaporación.

$P_e$  = 120 p.s.i. (ver Tabla No. 51 - Resultados de la segunda operación del sistema).

$T_e$  = Temperatura del gas refrigerante en la tubería de aspiración = temperatura en la entrada de la unidad de compresión = temperatura en la salida de la unidad de evaporación.

$T_e = 40^\circ\text{F} = 4,4^\circ\text{C}$ . (ver Ilustración No. 61 - Manómetro para línea de gas de baja presión).

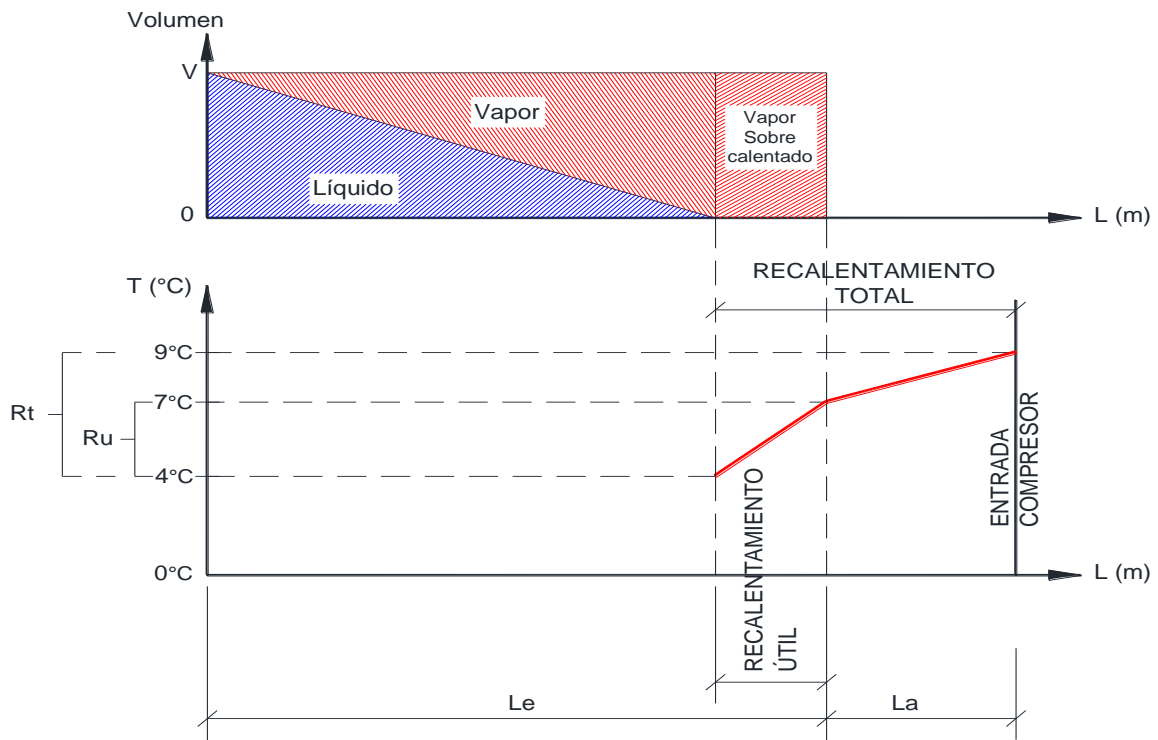


Ilustración 56. Comportamiento del gas refrigerante dentro de la unidad evaporadora

Donde:

$T$  = Temperatura, en  $^{\circ}\text{C}$ .

$L_e$  = Longitud del serpentín del evaporador, en metros.

$L_a$  = Longitud de la tubería de aspiración, en metros

$R_u$  = Recalentamiento útil, en  $^{\circ}\text{C}$ .

$R_t$  = Recalentamiento total, en  $^{\circ}\text{C}$ .

### RECALENTAMIENTO ÚTIL

$$R_u = T_{se} - T_e \quad (10)$$

Donde:

$R_u$  = Recalentamiento útil, en  $^{\circ}\text{C}$ .

$T_{se}$  = Temperatura a la salida del evaporador, en  $^{\circ}\text{C}$ .



$T_e$  = Temperatura de evaporación del gas refrigerante, en °C.

$$R_u = 7^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}$$

$$R_u = 3^\circ\text{C}$$

### RECALENTAMIENTO TOTAL

$$R_t = T_{ec} - T_e \quad (11)$$

Donde:

$R_t$  = Recalentamiento total, en °C.

$T_{ec}$  = Temperatura a entrada del compresor, en °C.

$T_e$  = Temperatura de evaporación del gas refrigerante, en °C.

$$R_t = 9^\circ\text{C} - 4^\circ\text{C}$$

$$R_t = 5^\circ\text{C}$$

### RECALENTAMIENTO NO ÚTIL

Este calentamiento es el que se produce en la línea de aspiración del compresor; comprende entonces la longitud de tubería a partir de la salida de la unidad evaporadora hasta la entrada al compresor.

$$R_{nu} = R_t - R_u \quad (12)$$

$$R_{nu} = 5^\circ\text{C} - 3^\circ\text{C}$$

$$R_{nu} = 2^\circ\text{C}$$

Este calentamiento no produce ningún beneficio en el sistema, no genera frío, pero si genera gasto de energía. Se debe entonces aislar la tubería de aspiración para aumentar la potencia frigorífica y disminuir el trabajo del compresor.

## DIAGRAMA PRESIÓN - ENTALPIA

El diagrama de Presión – Entalpía, también denominado Diagrama de Mollier, permite entender de una manera más fácil como funciona un circuito de intercambio de calor. El diagrama de Mollier o diagrama entálpico muestra cómo es el comportamiento de un gas refrigerante frente a diferentes condiciones de presión y temperatura y por extensión, permite calcular la potencia que se necesita en la unidad de evaporación, así como en la unidad de condensación y la potencia del compresor que va a impulsar el sistema. Para cada gas refrigerante presente en el mercado existe un diagrama particular que es elaborado por el fabricante. El diagrama presenta las siguientes zonas y líneas bien definidas:

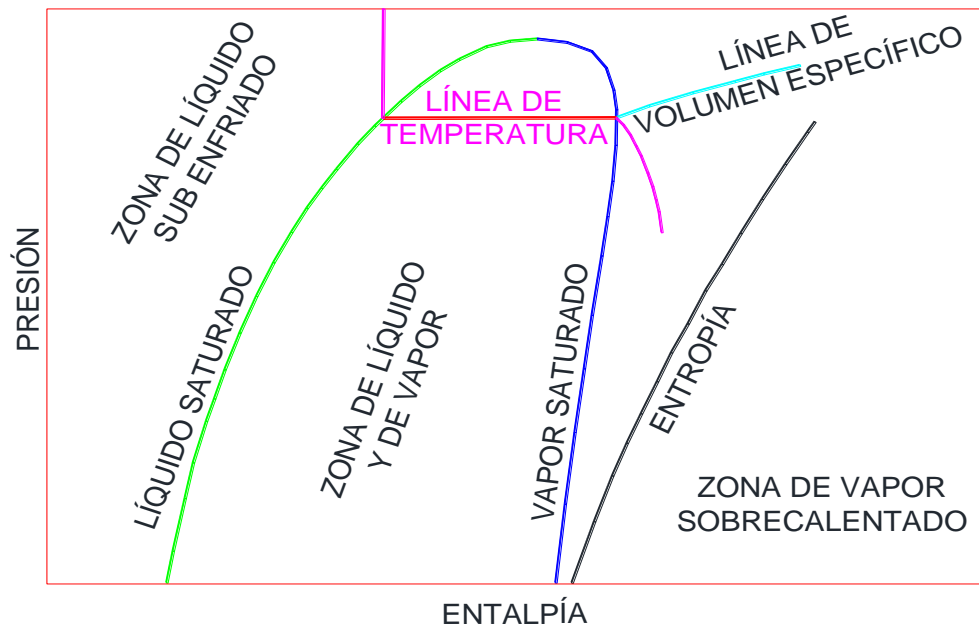


Ilustración 57. Zonas y líneas del diagrama Entálpico o Diagrama de Mollier

Datos de operación del sistema:

- 1) Presión de entrada al compresor = 120 p.s.i. = 8,27 Bar

- 2) Presión de salida del compresor = 500 p.s.i. = 34,47 Bar  
(Ver Tabla No. 51 - Resultados de la segunda operación del sistema)
- 3) Temperatura de entrada de vapor sobrecalentado en el compresor = 9 °C
- 4) Temperatura de entrada al condensador  $T_3 = 65,1$  °C, con subenfriamiento  $T_2 = 36,05$  °C  
(Ver cálculos en el numeral 3.2. Unidad condensadora)

Con los anteriores datos de operación del sistema, y apoyándonos en el diagrama de Mollier entregado por la Compañía Gas Servei para el gas refrigerante de tipo primario o frigorígeno R 410A (ver numeral 3.1.6.4. **Ficha técnica del gas refrigerante R 410A**), encontraremos los valores de operación típicos del mencionado gas, como se aprecia en la siguiente ilustración:

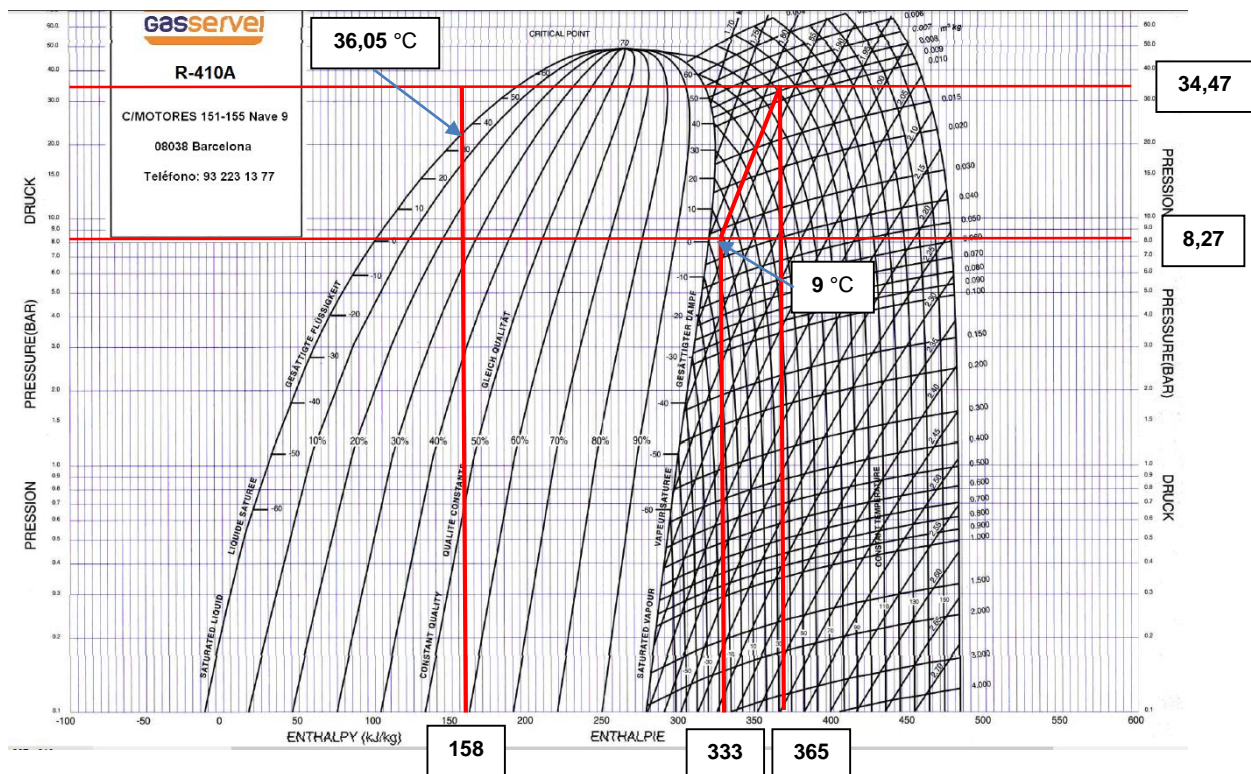
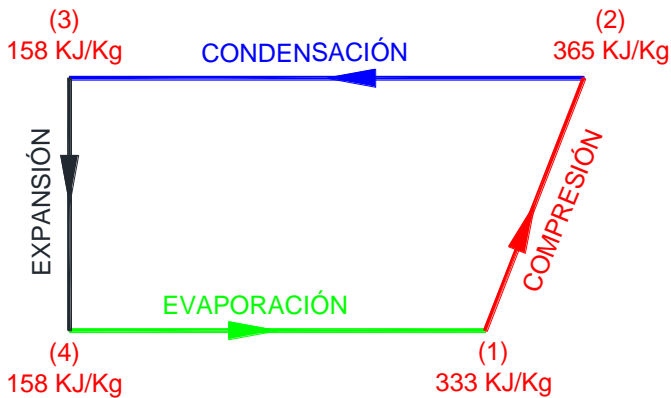


Ilustración 58. Entalpía del Gas R410A de acuerdo con las condiciones de operación establecidas en el circuito de intercambio térmico

Los resultados son:



| No. | DESCRIPCIÓN                       | VALOR     |
|-----|-----------------------------------|-----------|
| h1  | Entrada entálpica del compresor   | 333 KJ/Kg |
| h2  | Salida entálpica del compresor    | 365 KJ/Kg |
| h3  | Salida del compresor a T = 36,6°C | 158 KJ/Kg |
| h4  | Entrada en el evaporador          | 158 KJ/Kg |

### CICLO DE COMPRESIÓN

Haciendo el balance entre 1 – 2

$$h_1 + Q = h_2 + W \quad (13)$$

Donde:

Q = Calor aportado, Q = 0, por ser una compresión adiabática

W = Trabajo aportado

h<sub>1</sub> = Entalpía saliente

h<sub>2</sub> = Entalpía entrante

Despejando tenemos:

$$-W = h_2 - h_1$$

$$-W = 365 \frac{KJ}{Kg} - 333 \frac{KJ}{Kg}$$

$$-W = 32 \frac{KJ}{Kg}$$

## CICLO DE CODENSACIÓN

Haciendo el balance entre 2 – 3

$$h_2 + Q = h_3 + W \quad (14)$$

Donde:

Q = Calor rechazado

W = Trabajo aportado, W = 0

$h_2$  = Entalpía saliente

$h_3$  = Entalpía entrante

Despejando tenemos:

$$Q = h_3 - h_2$$
$$Q = 158 \frac{KJ}{Kg} - 365 \frac{KJ}{Kg}$$
$$Q = -207 \frac{KJ}{Kg}$$

El calor es cedido por el refrigerante

## CICLO DE EXPANSIÓN

Haciendo el balance entre 3 – 4

$$h_3 + Q = h_4 + W \quad (15)$$

Donde:

Q = Calor rechazado, Q = 0

W = Trabajo aportado, W = 0

$h_3$  = Entalpía saliente

$h_4$  = Entalpía entrante

Despejando tenemos:

$$h_3 = h_4 = 158 \frac{KJ}{Kg}$$

Es un proceso que se da a entalpía constante, sucede en el serpentín.

### **CICLO DE EVAPORACIÓN**

Haciendo el balance entre 4 – 1

$$h_4 + Q = h_1 + W \quad (16)$$

Donde:

Q = Calor rechazado

W = Trabajo aportado, W = 0

$h_4$  = Entalpía saliente

$h_1$  = Entalpía entrante

Despejando tenemos:

$$Q = h_1 - h_4$$

$$Q = 333 \frac{KJ}{Kg} - 158 \frac{KJ}{Kg}$$

$$Q = 175 \frac{KJ}{Kg}$$

El trabajo es positivo y corresponde al efecto refrigerante.

### **COEFICIENTE DE FUNCIONAMIENTO**

Se define como la relación entre el efecto refrigerante y el trabajo realizado

$$CF = \frac{ER}{W} \quad (17)$$

Donde:

CF = Coeficiente de funcionamiento

ER = Efecto refrigerante

W = Trabajo aportado

$$CF = \frac{ER}{W} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{175}{32}$$

$$CF = 5,469$$

### CAUDAL EN MASA DE REFRIGERANTE

$$\dot{m} = \frac{CAP_R}{ER} \quad (18)$$

Donde:

$\dot{m}$  = Caudal en masa de refrigerante, en Kg/min.

CAP<sub>R</sub> = Capacidad de refrigeración, es la capacidad nominal del equipo, en Kcal/min.

ER = Efecto refrigerante, en Kcal/Kg.

$$CAP_R = 1.465 W$$

TRF = Tonelada de refrigeración. Se define como la cantidad de calor latente absorbida por la fusión de una tonelada corta de hielo sólido en 24 horas.

$$1 \text{ TRF} = 12.000 \text{ BTU/hora} = 3,517 \text{ KW (NIST, Special Publication 811, 2008)}$$

$$1 \text{ KJ/Kg} = 0,239 \text{ Kcal/Kg}$$

$$CAP_R = 1.465W * \frac{1 \text{ TRF}}{3.517 W}$$

$$CAP_R = 0,4165 \text{ TRF}$$

$$CAP_R = 0,4165 TRF * \frac{3023,95 KCal}{1 TRF * hora} * \frac{1 hora}{60 minutos}$$

$$CAP_R = 20,99 \frac{KCal}{min}$$

$$\dot{m} = \frac{CAP_R}{ER} = \frac{20,99 \frac{KCal}{min}}{175 \frac{KJ}{Kg} * \frac{0,239 KCal}{1 KJ}}$$

$$\dot{m} = 0,50 \frac{Kg}{min}$$

### DIMENSIONES DE LA TUBERÍA DEL EVAPORADOR

Por principio de Bernoulli tenemos que:

$$P_1 A_1 = P_2 A_2 \quad (19)$$

Donde:

$P_1$  = Presión de salida del compresor = 500 p.s.i. = 34,47 Bar

$P_2$  = Presión de entrada al compresor = 120 p.s.i. = 8,27 Bar

(Ver Tabla No. 51 - Resultados de la segunda operación del sistema)

$A_1$  = Área de la tubería de salida del compresor = área de la tubería del condensador

$A_2$  = Área de la tubería de entrada al compresor = área de la tubería del evaporador

$$A_1 = \frac{\pi * D_1^2}{4} \quad (20)$$

Donde:

$D_1$  = Diámetro interno de la tubería del condensador = 2.36 mm = 0,092"

(Ver numeral 3.2.2. Selección del tipo de intercambiador de calor)



$$A_1 = \frac{\pi * 2,36^2}{4}$$

$$A_1 = 4,37 \text{ mm}^2 = 0,0067 \text{ pulg}^2$$

Despejando de (19) tenemos:

$$A_2 = \frac{P_1 A_1}{P_2} \quad (21)$$

$$A_2 = \frac{500 \text{ psi} * 0,0067 \text{ pulg}^2}{120 \text{ psi}}$$

$$A_2 = 0,031 \text{ pulg}^2$$

También sabemos que:

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 * A_2}{\pi}} \quad (22)$$

Donde:

$D_2$  = Diámetro interno de la tubería del evaporador

$$D_2 = \sqrt{\frac{4 * 0,031 \text{ pulg}^2}{\pi}}$$

$$D_2 = 0,1989 \text{ pulg}^2 = 5,05 \text{ mm}^2$$

Perímetro del tubo  $P_t$ :

$$P_t = 2 * \pi * \frac{di}{2} \quad (23)$$

$$P_t = 2 * \pi * \frac{5,05 \text{ mm}}{2}$$

$$P_t = 15,87 \text{ mm}$$

Longitud de tubería evaporador:

$$L_t = \frac{A}{P_t} \quad (24)$$

Según diseño geométrico, el evaporador tiene las siguientes dimensiones:

Largo = 26,5 cm  
Alto = 21 cm  
Área = 0,0556 m<sup>2</sup>

Entonces:

$$L_t = \frac{0,0556 \text{ m}^2}{15,87 \text{ mm}}$$

$$L_t = 3,50 \text{ m}$$

La tubería comercial de cobre flexible más cercana corresponde a un diámetro nominal de 5/16" que posee un diámetro interno de 6 mm.

Se utilizará tubería de cobre de d=5/16":

Diámetro exterior de = 9 mm

Espesor de pared e = 1,5 mm

Diámetro interior di = 6 mm

*Tabla 34. Componentes del conjunto unidad evaporadora*

| No. | COMPONENTE               | OBSERVACIONES                   |
|-----|--------------------------|---------------------------------|
| 4   | UNIDAD EVAPORADORA       | Ver despiece en numeral 3.5     |
| 4.1 | Serpentín                | Ver despiece en numeral 3.5.2.1 |
| 4.2 | Dispositivo de control   | Ver despiece en numeral 3.5.2.2 |
| 4.3 | Chasis                   |                                 |
| 5   | MODULO DE COMPRESIÓN     | Ver despiece en numeral 3.6     |
| 6   | RECOLECCIÓN AGUA TRATADA | Ver despiece en numeral 3.7     |

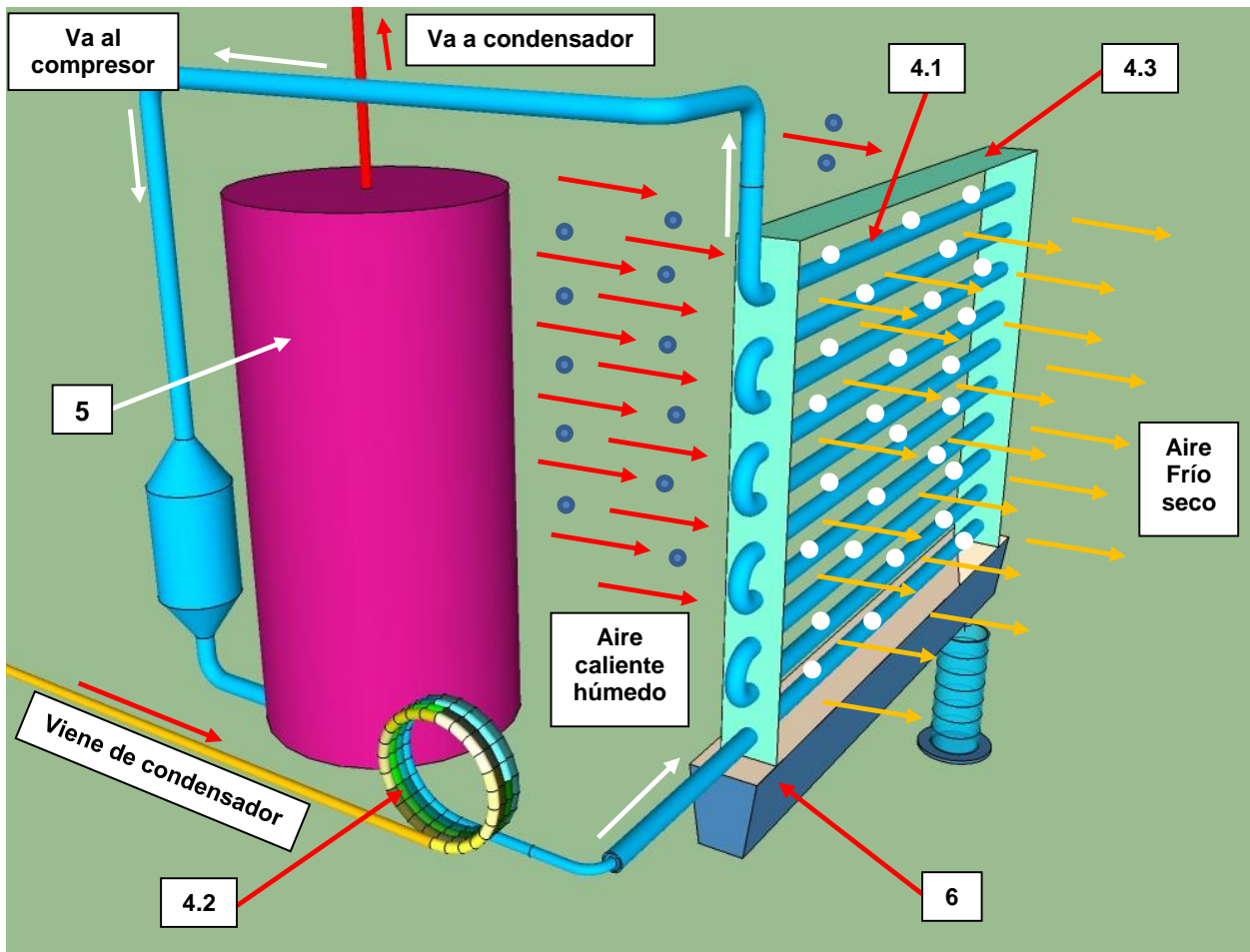


Ilustración 59. Conjunto unidad evaporadora

### 3.5.1. Función de la unidad evaporadora

La unidad evaporadora cumple dos funciones cuando se enfrenta al flujo de aire caliente y húmedo que viene por el túnel de viento después de que ha pasado a través de la banda absorbente:

- ✚ Absorber el calor del volumen de aire caliente y húmedo que viene por el túnel de viento para así:
- ✚ Retener en su serpentín la humedad presente en la masa de aire por efecto de congelamiento o cristalización de las moléculas de agua en la superficie del serpentín frío.

### 3.5.2. Componentes de la unidad evaporadora

#### 3.5.2.1. Serpentín



Ilustración 60. Serpentín del evaporador

Está formado por una serie de tubos, a través de los cuales circula el gas refrigerante. El refrigerante ebulle dentro del serpentín absorbiendo el calor latente (Wirz, 2008, pág. 14). Cuando el aire caliente y húmedo que viene por el túnel de viento desde el equipo dosificador de agua cruda entra en contacto con la tubería del evaporador, la temperatura del gas refrigerante aumenta, absorbiendo el calor de la masa de aire, esta condición propicia la sublimación inversa y la posterior condensación de la humedad presente en el aire alrededor del serpentín. El incremento de la temperatura hace que el refrigerante se evapore más rápidamente.

Tabla 35. Especificaciones técnicas del serpentín del evaporador

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SERPENTÍN |                         |                        |
|---|-------------------------|------------------------|
| DIMENSIONES GENERALES                   | LONGITUD                | 26.5 cm                |
|   | ALTURA                  | 21 cm                  |
|   | ESPEJOR                 | 2,5 cm                 |
|   | ÁREA ESPECÍFICA         | 556,50 cm <sup>2</sup> |
| DIMENSIONES TUBERÍA                     | LONGITUD TUBERÍA        | 583 cm                 |
|   | DIÁMETRO TUBERÍA        | 5/16"                  |
|   | MATERIAL TUBERÍA        | COBRE                  |
|   | MAX. PRESIÓN DE TRABAJO | 174 PSI                |

### 3.5.2.2. Dispositivo de control

La válvula de expansión es un dispositivo de control que se encarga de proporcionar refrigerante a la unidad evaporadora, y para tal efecto toma el líquido refrigerante enfriado –que viene desde la unidad condensadora-, y lo atomiza, es decir, lo convierte en un flujo de pequeñas gotas de refrigerante que ingresan al serpentín del evaporador y en este estado promueve la vaporización del líquido refrigerante; en este proceso la válvula disminuye la presión y como consecuencia el refrigerante convertido en gas disminuye su temperatura, enfriando las paredes del serpentín del evaporador. Cuando el flujo de aire caliente y húmedo que se desplaza por el túnel de viento entra en contacto con las paredes externas del serpentín, hace que el gas refrigerante ebulle dentro del serpentín; este proceso de ebullición del gas refrigerante produce aún más disminución de su temperatura y aumenta su capacidad de absorber más calor. Al absorber calor, el gas disminuye la temperatura del serpentín.

Para este diseño específico se utilizará como dispositivo de control, un tubo capilar (que no es más que una tubería de cobre de pequeño diámetro), el cual se adapta mucho mejor a la operación de pequeños sistemas como el que nos ocupa.

Cuando el líquido refrigerante viene desde la unidad condensadora, circula a alta presión por la tubería, esta tubería desemboca en el tubo capilar que tiene un diámetro interior sensiblemente menor al que posee la tubería. El drástico cambio de la sección transversal produce un aumento de la velocidad del líquido (por el efecto venturi) y una caída de la presión. Esta condición de flujo provoca que el líquido refrigerante a alta presión se atomice y se transforme en un líquido refrigerante atomizado a una más baja presión, que se transforma fácilmente en gas refrigerante dentro del evaporador.

Tabla 36. Especificaciones técnicas del dispositivo de control de la unidad evaporadora

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL TUBO CAPILAR |                 |         |
|--|-----------------|---------|
| DIMENSIONES<br>GENERALES                   | LONGITUD        | 85 cm   |
|  | SECCIÓN INTERNA | 1,37 mm |
| MATERIAL TUBERÍA                           | COBRE           |         |



Ilustración 61. Dispositivo de control de la unidad evaporadora – Tubo capilar



### 3.6. Módulo de compresión

El módulo de compresión cumple dos funciones específicas:

- ✚ Se encarga de bombear el gas refrigerante a través de todo el sistema y lo mantiene en circulación.
- ✚ Toma el gas refrigerante que sale de la unidad evaporadora y lo comprime a una presión más alta para elevar su temperatura y entregarlo hacia la unidad condensadora. En este proceso el gas refrigerante también absorbe el calor producido por el motor del compresor.

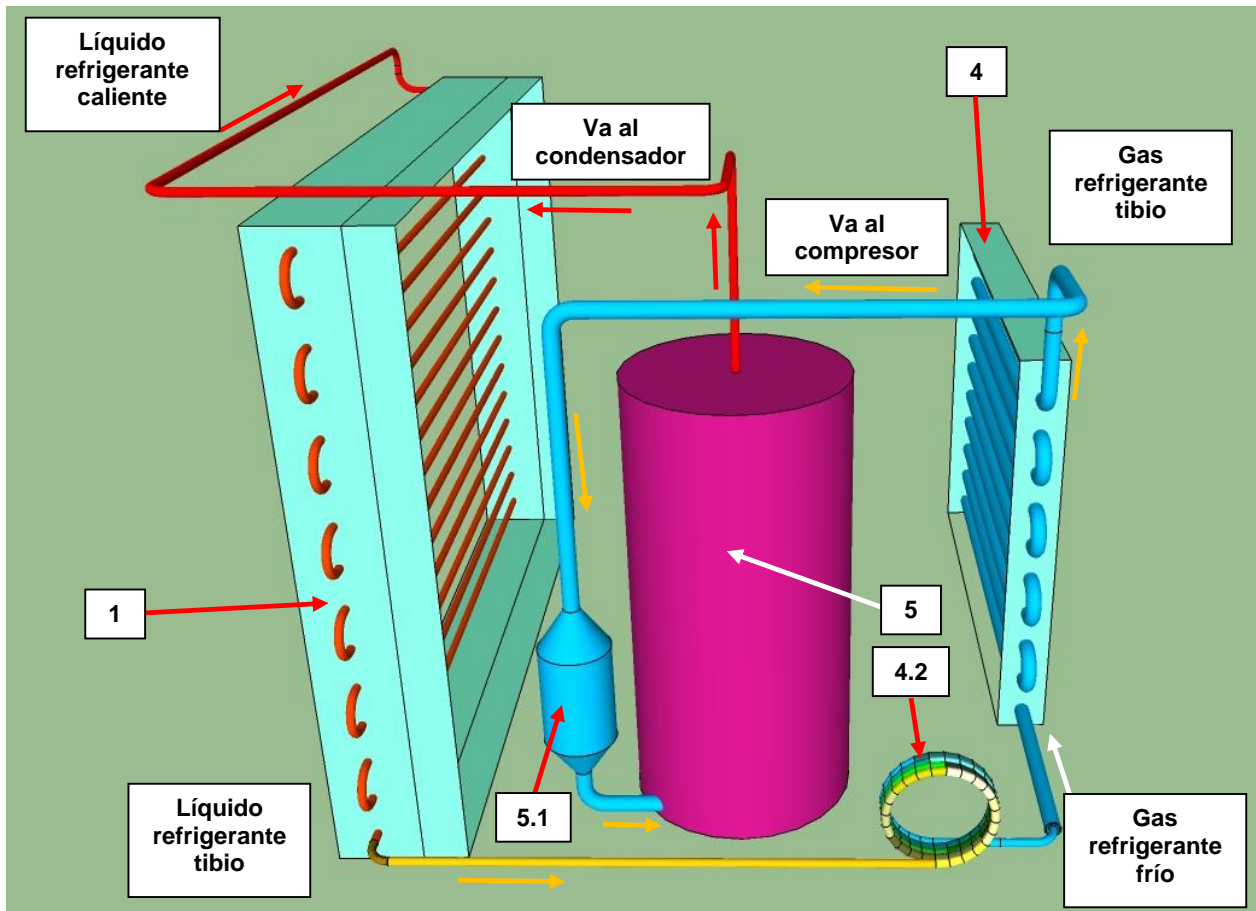


Ilustración 62. Función módulo de compresión

Tabla 37. Componentes del módulo de compresión

| No. | COMPONENTE                     | OBSERVACIONES                   |
|-----|--------------------------------|---------------------------------|
| 1   | UNIDAD CONDENSADORA            | Ver despiece en numeral 3.2     |
| 4   | UNIDAD EVAPORADORA             | Ver despiece en numeral 3.5     |
| 4.2 | Dispositivo de control         | Ver despiece en numeral 3.5.2.2 |
| 5   | MODULO DE COMPRESIÓN           | Ver despiece en numeral 3.6     |
| 5.1 | Botella recolección condensado |                                 |

En su primer ciclo de funcionamiento (denominado carrera de entrada o de aspiración), el pistón del compresor abre la válvula de láminas de aspiración permitiendo la entrada del gas refrigerante que viene de la unidad evaporadora por la tubería llamada línea de baja presión, llenando con esta acción el cilindro (ver figura A de la siguiente ilustración); una vez termina la carrera de entrada, se cierra la válvula de aspiración.

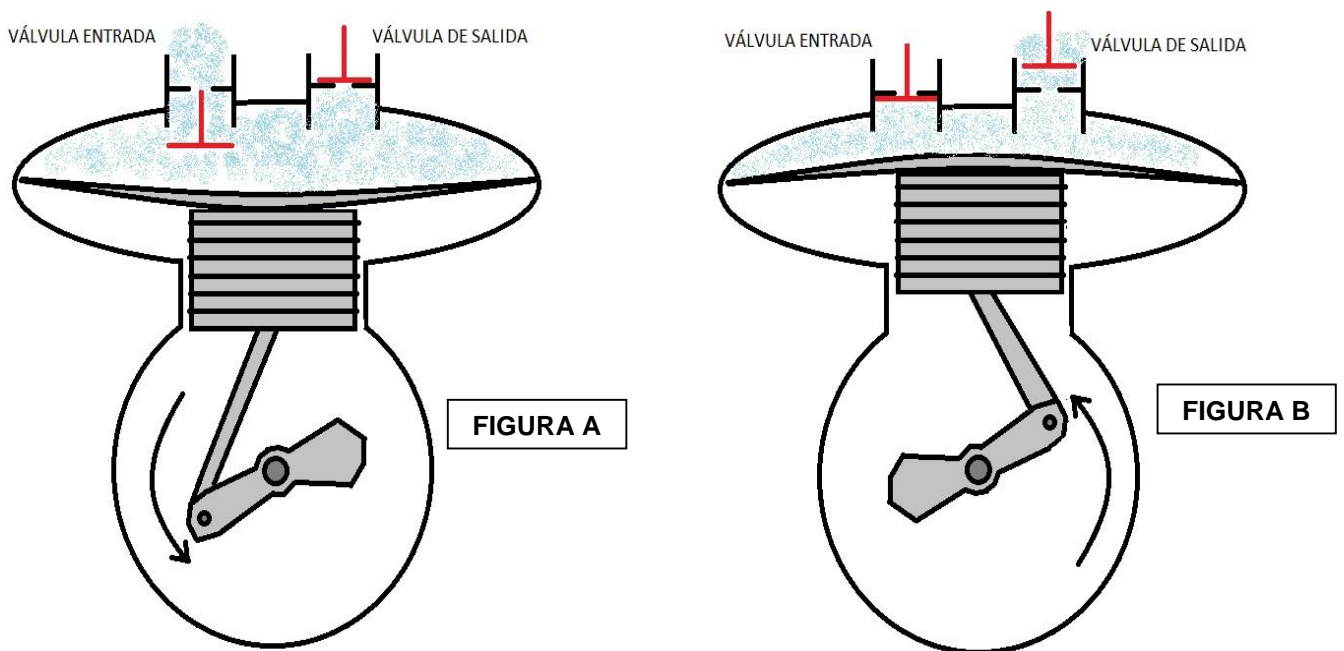


Ilustración 63. Ciclo de operación del compresor

Fuente: (leroymerlin.es, 2019). Obtenido de <http://www.leroymerlin.es/https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Bricopedia-Iluminaci%C3%B3n-y/Qu%C3%A9-es-un-compresor-de-aire-el%C3%A9ctrico/ta-p/5339>



En su segundo ciclo de operación (denominado carrera de compresión), el pistón comienza a elevarse y comprime el gas refrigerante contenido dentro del cilindro aumentando la presión. Cuando la presión en el cilindro se hace mayor que la presión dentro de la tubería que va al condensador (llamada línea de alta presión), la válvula de láminas de descarga se abre permitiendo la salida del gas refrigerante a alta presión y alta temperatura hacia la unidad condensadora (ver figura B de la anterior ilustración). Este proceso se repite continuamente.

La primera ley de la termodinámica establece una relación entre la energía interna del sistema y la energía que intercambia con el entorno en forma de calor o trabajo. Determina que la energía interna de un sistema aumenta cuando se le transfiere calor o se realiza un trabajo sobre él.

$$Q + W = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (25)$$

Donde:

Q = Calor aportado, Q = 0, por ser una compresión adiabática

W = Trabajo aportado, en KJ/seg.

$\dot{m}$  = Caudal en masa de refrigerante, en Kg/min.

hs = Entalpía saliente, en KJ/Kg.

he = Entalpía entrante, en KJ/Kg.

Entonces:

$$W = \dot{m}(h_s - h_e)$$

hs = h1 = 365 KJ/Kg

he = h2 = 333 KJ/Kg

$$W = 0,50 \frac{Kg}{min} * \frac{1 min}{60 seg} \left( 365 \frac{KJ}{Kg} - 333 \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$W = 0,00833 \frac{Kg}{seg} * \left( 32 \frac{KJ}{Kg} \right)$$

$$W = 0,2667 \frac{KJ}{seg}$$

### POTENCIA MECÁNICA DEL COMPRESOR

$$W = 0,2667 \frac{KJ}{seg} = 959,76 \frac{KJ}{hora}$$

$$1 \text{ Kcal/hora} = 4,184 \text{ KJ/Kg}$$

$$W = 959,76 \frac{KJ}{hora} * \frac{0,000277 \text{ KW}}{1 \text{ KJ/hora}}$$

$$W = 0,2667 \text{ KW} = 266,7 \text{ W}$$

### POTENCIA NOMINAL

$$Hp = 959,76 \frac{KJ}{hora} * \frac{1 \text{ Hp}}{2.684,5197 \frac{KJ}{hora}}$$

$$Hp = 0,3575 \text{ Hp}$$

### POTENCIA REAL

$$Hp = \frac{\text{Potencia nominal}}{\text{eficiencia}}$$

$$Hp = \frac{0,3575 \text{ Hp}}{0,75}$$

$$Hp = 0,476 \text{ Hp} \approx 0,50 \text{ Hp}$$

Tabla 38. Especificaciones técnicas del compresor

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL COMPRESOR |                   |           |
|---|-------------------|-----------|
| DIMENSIONES GENERALES                   | DIÁMETRO          | 10 cm     |
|   | ALTURA            | 22 cm     |
| MOTOR                                   | MODELO            | 39A121AS  |
|   | CONFIGURACIÓN     | A&14KA    |
|   | VOLTAJE           | 115 V     |
|   | FRECUENCIA        | 60 Hz     |
|   | PHASE             | 1         |
|   | L.R.A.            | 26.0 Amp. |
|   | TIPO REFRIGERANTE | R-410A    |

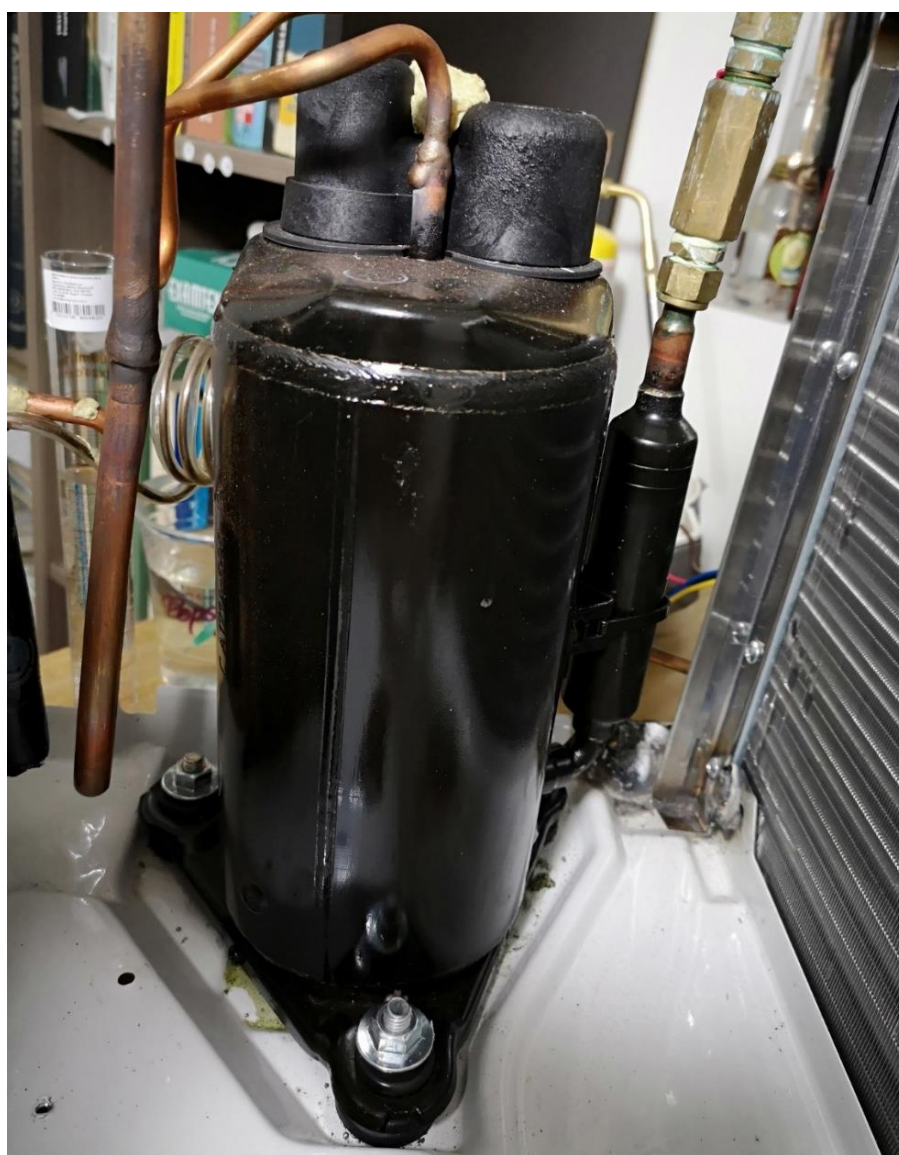


Ilustración 64. Módulo de compresión

### 3.7. Recolección de agua tratada

El vapor de agua que entra en contacto con el serpentín del evaporador queda atrapado alrededor de este debido al proceso de sublimación inversa (también llamado cristalización), convirtiéndose en una capa de escarcha que posteriormente y como consecuencia de elevar su temperatura a temperatura ambiente, se condensa y fluye por gravedad en gotas de agua hacia la parte inferior del evaporador. Es allí donde será recolectada el agua por medio de una canaleta que la transporta hacia su almacenamiento final.

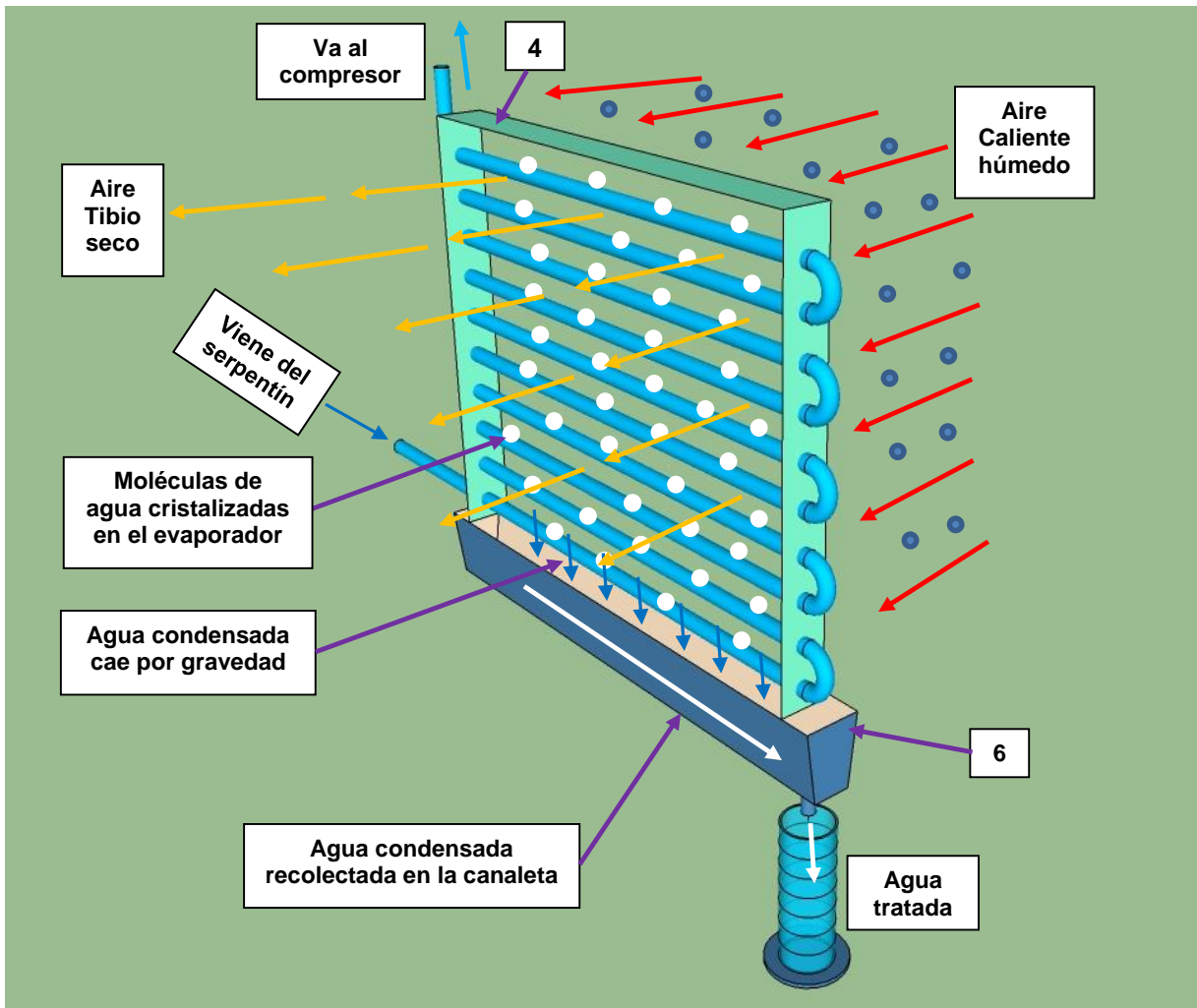


Ilustración 65. Funcionamiento de la canaleta de agua tratada

Tabla 39. Componentes del conjunto recolección de agua tratada

|   | COMPONENTE               | OBSERVACIONES               |
|---|--------------------------|-----------------------------|
| 4 | UNIDAD EVAPORADORA       | Ver despiece en numeral 3.5 |
| 6 | RECOLECCIÓN AGUA TRATADA | Ver despiece en numeral 3.7 |



Ilustración 66. Canaleta de recolección de agua tratada

Tabla 40. Especificaciones técnicas de la canaleta de recolección de agua tratada

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA CANALETA DE RECOLECCIÓN DE AGUA TRATADA |                          |                    |
|---|--------------------------|--------------------|
| DIMENSIONES<br>GENERALES  | LONGITUD                 | 32 cm              |
|   | ANCHO DE LA CORONA       | 5 cm               |
|   | ANCHO DEL FONDO          | 3 cm               |
|   | ALTURA DE LA CANALETA    | 5 cm               |
|   | ÁREA SECCIÓN TRANSVERSAL | 20 cm <sup>2</sup> |
|   | PENDIENTE LONGITUDINAL   | 1 %                |
|   | DIÁMETRO TUBO DE SALIDA  | 0,9 cm             |
| MATERIAL  | LÁMINA ACERO INOXIDABLE  |                    |

### 3.8. Instrumentación para el control de la operación

#### 3.8.1. Manómetro control línea de alta presión



Ilustración 67. Manómetro para línea de gas de alta presión

La línea de tubería de cobre que conduce el gas refrigerante desde el módulo de compresión (ver numeral 3.6) hacia la unidad condensadora (ver numeral 3.2), se denomina línea de alta presión, en razón a que, por efectos del trabajo realizado por el compresor, el gas circula por esta línea a alta presión. Para este sistema, se ha diseñado una presión de carga del gas refrigerante de 175 psi y una presión de operación en la línea de

alta presión de 450 psi., con una máxima presión de operación correspondiente a 550 psi.

Con este manómetro se controla la presión de trabajo del compresor, así como la temperatura de saturación del gas refrigerante a la presión indicada.

Tabla 41. Especificaciones técnicas del manómetro de alta presión

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MANÓMETRO DE ALTA PRESIÓN |          |            |     |
|---|----------|------------|-----|
| RANGO DE PRESIÓN  | 0 a +800 |            | Psi |
| TEMPERATURAS DE SATURACIÓN                              | R - 410A | -20 a +150 | °F  |
|   | R - 22   | 0 a +200   | °F  |
|   | R - 404A | +10 a +130 | °F  |



### 3.8.2. Manómetro control línea de baja presión



Ilustración 68. Manómetro para línea de gas de baja presión

La línea de tubería de cobre que conduce el gas refrigerante desde la unidad evaporadora (ver numeral 3.5), exactamente a partir del dispositivo de control ubicado en la salida de la unidad evaporadora hacia el módulo de compresión (ver numeral 3.6), se denomina línea de baja presión, en razón a que por efectos del trabajo realizado por el dispositivo de control (ver numeral 3.5.2.2), el gas circula por esta línea a baja presión. Para este sistema, se ha diseñado una presión de

carga del gas refrigerante de 200 psi y una presión de operación en la línea de baja presión de 80 psi., con una máxima presión de succión correspondiente a 200 psi.

Con este manómetro se controla la presión de trabajo del dispositivo de control, así como la temperatura de saturación del gas refrigerante a la presión indicada.

Tabla 42. Especificaciones técnicas del manómetro de baja presión

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MANÓMETRO DE ALTA PRESIÓN |             |            |                |
|---|-------------|------------|----------------|
| RANGO DE VACÍO  | 0 a 30      |            | Pulgadas de Hg |
| RANGO DE PRESIÓN  | 0 a +250    |            | Psi            |
| RANGO DE SOBREPRESIÓN                                   | +250 a +500 |            | Psi            |
| TEMPERATURAS DE SATURACIÓN                              | R - 410A    | -80 a +80  | °F             |
|   | R - 22      | 0 a +110   | °F             |
|   | R - 404A    | -40 a +100 | °F             |

### 3.8.3. Termómetros equipos condensador y evaporador



Ilustración 69. Termómetros digitales para control de temperatura en la Unidad Condensadora y en la Unidad Evaporadora

La temperatura del aire en la unidad condensadora (que queda al inicio del túnel de viento), es una de las variables fundamentales y tal vez la más importante que afectan el proceso de evaporación del agua de mar que se establece en este equipo, de tal manera que se hace imprescindible llevar el registro automático y en tiempo real de la variación de temperatura que presentan las corrientes de aire inducidas en el túnel de viento a lo largo de los procesos establecidos. Para este efecto se instaló un termómetro digital con sonda de alta precisión.

En contraposición, la temperatura de las tuberías del serpentín pertenecientes a la unidad evaporadora (que queda al final del túnel de viento), es fundamental porque de ella depende la eficiencia en el proceso de retención de la humedad contenida en las corrientes de viento que atraviesan la unidad evaporadora, mediante el proceso de condensación. Para este efecto se instaló un termómetro digital con sonda de alta precisión.



Tabla 43. Especificaciones técnicas de los termómetros digitales para el condensador y el evaporador

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS TERMÓMETROS DIGITALES |            |    |                      |
|--|------------|----|----------------------|
| RANGO DE MEDIDA  | -10 a +50  | °C | Temperatura interior |
|  | +14 a +122 | °F |                      |
|  | -50 a +70  | °C | Temperatura ambiente |
|  | -58 a +158 | °F |                      |
| PRESICIÓN  | ± 1 °C     |    | ± 1,8 °F             |
| EXACTITUD  | 0,1        |    | °C / °F              |
| TIEMPO DE LECTURA                                      | 10         |    | Segundos             |

### 3.8.4. Higrómetro túnel de viento

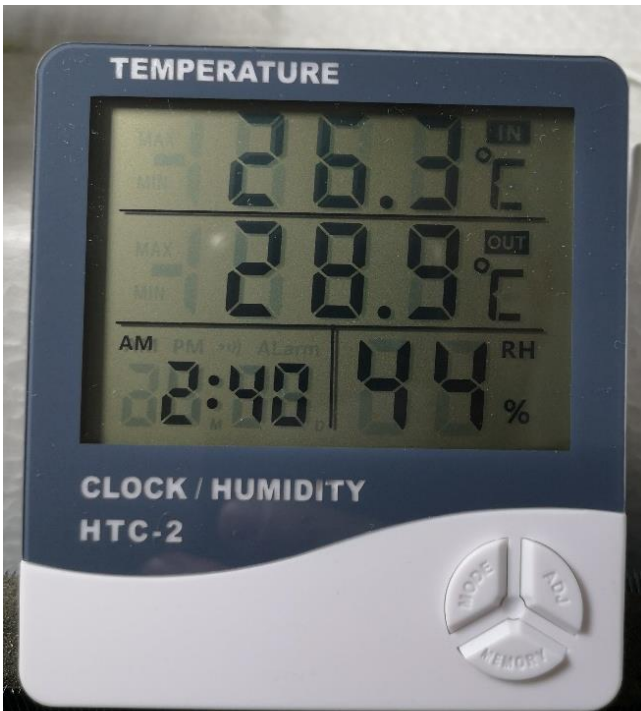


Ilustración 70. Higrómetro que mide la humedad relativa y la temperatura del túnel de viento

Como se verá mas adelante, en el Capítulo 4 **Experimentación y ecuaciones**, la humedad relativa juega un papel fundamental en el proceso de evaporación, en el entendido de que la humedad relativa muestra la relación que existe entre la cantidad de vapor de agua que tiene la masa de aire de interés y la máxima que podría contener.

Es fundamental determinar cuál es el valor de esta variable dentro del

túnel de viento, en la zona de la banda absorbente donde se presenta el proceso de evaporación, con el fin de determinar la eficiencia de la unidad evaporadora. En ese contexto, el equipo se instrumentó con un higrómetro que lee en tiempo real la humedad relativa de la masa de aire dentro de la corriente de interés en el túnel de viento, así como su temperatura.

Tabla 44. Especificaciones técnicas del higrómetro del túnel de viento

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HIGRÓMETRO DIGITAL |            |          |                  |
|--|------------|----------|------------------|
| RANGO DE MEDIDA                                  | 10%        | 99%      | Humedad relativa |
| PRESICIÓN  | ± 5 %      |          |                  |
| EXACTITUD  | 1 %        |          |                  |
| RANGO DE MEDIDA                                  | -10 a +50  | °C       | Temperatura      |
|  | +14 a +122 | °F       |                  |
| PRESICIÓN  | ± 1 °C     | ± 1,8 °F |                  |
| EXACTITUD  | 0,1        | °C / °F  |                  |

### 3.8.5. Hidrómetro tanque de igualación

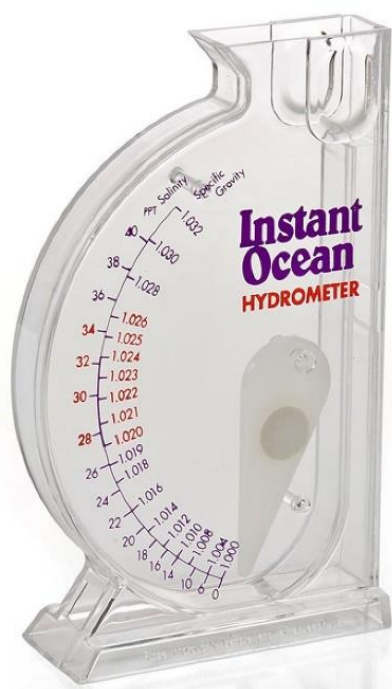


Ilustración 71. Hidrómetro que registra la densidad relativa y la salinidad del agua de entrada al equipo

Teniendo en cuenta que el equipo está diseñado para evaporar agua salada, y que como se ilustró en el capítulo 3, numeral 3.1.2. **Propiedades del agua marina**, las sales disueltas en el agua se descomponen en iones cargados positiva y negativamente y que la salinidad es una medida de la cantidad de sales disueltas en el agua, es fundamental para el proceso medir la salinidad.

El hidrómetro análogo instalado en el tanque de igualación está en la capacidad de medir la densidad relativa del agua, la cual, mediante fórmulas establecidas puede convertirse a salinidad.

La densidad relativa es la misma densidad relativa del agua salada, es decir, la relación entre la densidad del agua de mar y el agua dulce. Este hidrómetro está provisto con dos escalas que miden la densidad relativa y la salinidad en gramos por litro o partes por mil (ppt).

Tabla 45. Especificaciones técnicas del hidrómetro del tanque de igualación

| ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL HIDRÓMETRO |       |       |                 |
|--|-------|-------|-----------------|
| RANGO DE MEDIDA                          | 26    | 36    | Salinidad (ppt) |
| DENSIDAD RELATIVA                        | 1,018 | 1,028 |                 |

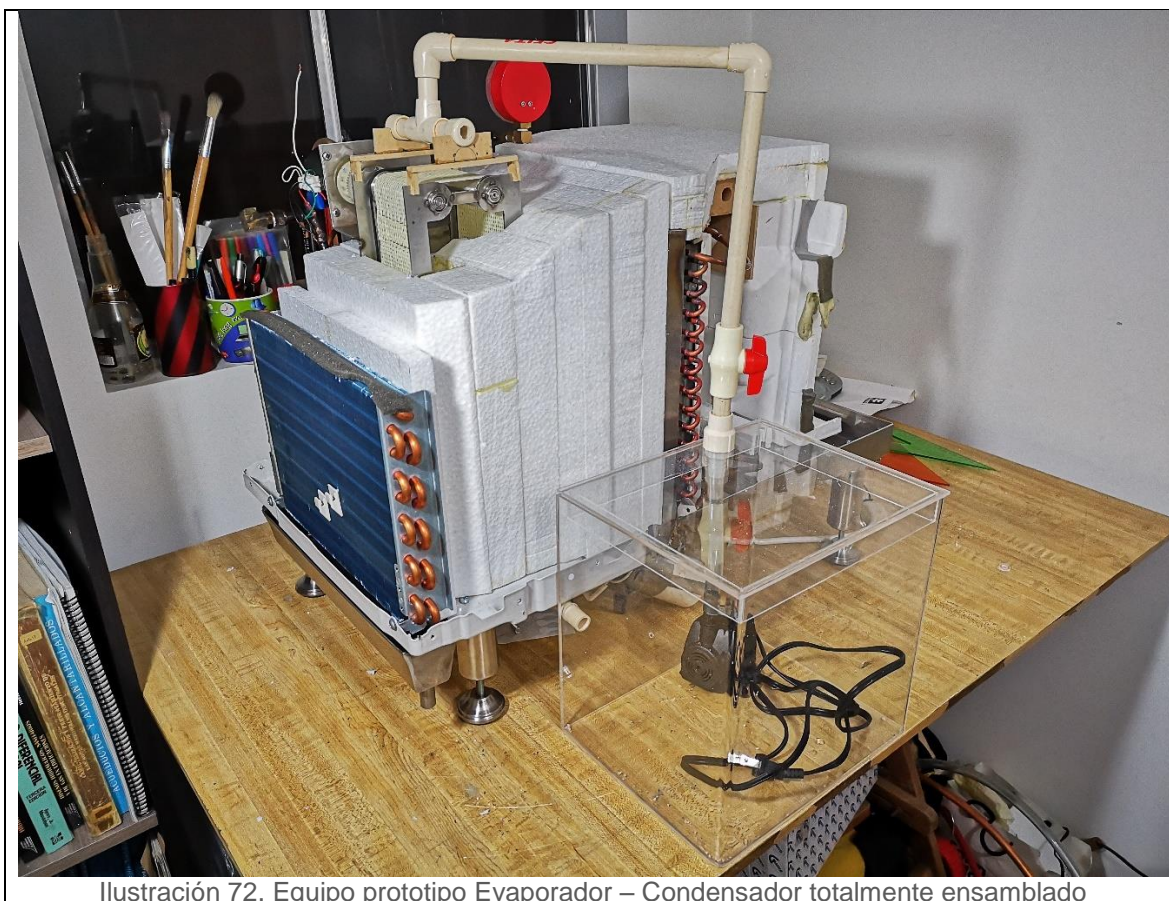


Ilustración 72. Equipo prototipo Evaporador – Condensador totalmente ensamblado

## Capítulo 4 – Experimentación y ecuaciones

### 4.1. Operación del sistema

En atención a que, uno de los objetivos del presente proyecto tiene que ver con que: *“apoyado en el equipo prototipo construido, se debe calcular las eficiencias de proceso de cada una de las operaciones unitarias implementadas para posteriormente compararlas con las fórmulas teóricas existentes y de esta manera determinar el error presentado entre las expresiones matemáticas conocidas y los experimentos prácticos realizados”*, se hace necesario medir de manera exacta el volumen de agua cruda que entra al sistema y que corresponderá con el volumen exacto de agua evaporada por el equipo. Para tal efecto, en la primera prueba de operación no se utilizará caudal de recirculación de agua cruda, lo que significa que no se empleará al 100 % la capacidad de evaporación del equipo.

#### 4.1.1. Resultados de la primera prueba de operación

Para la primera prueba de operación del sistema se adoptaron los siguientes parámetros iniciales:

*Tabla 46. Parámetros iniciales de la primera operación del sistema*

| PARÁMETRO DE OPERACIÓN DEL EQUIPO               |            |
|---|------------|
| Tipo de gas refrigerante utilizado              | R410A      |
| Carga inicial de gas refrigerante en el sistema | 254 gramos |
| Presión de carga inicial de refrigerante        | 190 p.s.i. |
| Temperatura ambiente                            | 22,6 °C    |
| Temperatura del agua cruda                      | 18,5 °C    |
| Sitio de prueba                                 | Bogotá     |
| Humedad relativa                                | 44%        |
| Altitud   | 2640 msnm  |
| Presión atmosférica                             | 560 mmHg   |

Teniendo en cuenta que el equipo funciona al 100% de su capacidad, que en consecuencia el evaporador trabaja también al 100% de su capacidad de enfriamiento y que el caudal de agua cruda que se pretende evaporar en esta primera prueba de operación es inferior a la capacidad del evaporador, se encuentra que el agua evaporada en la banda transportadora y transportada por las corrientes de viento, sufre un proceso de sublimación inversa alrededor del serpentín del evaporador al pasar por esta estructura. En consecuencia, para poder medir los resultados de condensación de agua, el equipo será operado en dos ciclos denominados ciclo de carga y ciclo de descarga, como se describe a continuación:

*Tabla 47. Ciclos de operación del sistema*

| <b>CICLOS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA</b> |                   |      |                              |
|--|-------------------|------|------------------------------|
| <b>No.</b>                             | <b>NOMBRE</b>     |      | <b>OPERACIONES UNITARIAS</b> |
| 1                                      | Ciclo de carga    | 1.1. | Dosificación de agua cruda   |
|  |                   | 1.2. | Calentamiento de aire        |
|  |                   | 1.3. | Impulsión de aire caliente   |
|  |                   | 1.4. | Evaporación de agua cruda    |
|  |                   | 1.5. | Sublimación inversa del agua |
| 2                                      | Ciclo de descarga | 2.1. | Fusión del agua tratada      |
|  |                   | 2.2. | Recolección del agua tratada |

Para la prueba inicial se adoptaron los siguientes tiempos de operación:

*Tabla 48. Tiempos de operación del sistema discriminados por ciclos*

| <b>TIEMPOS DE OPERACIÓN DEL EQUIPO</b> |                     |                   |
|--|---------------------|-------------------|
| <b>IMPULSO</b>                         | <b>CICLO</b>        | <b>TIEMPO</b>     |
| Primer impulso                         | Ciclo de carga      | 40 minutos        |
|  | Ciclo de descarga   | 5 minutos         |
|  | Tiempo de operación | 45 minutos        |
| Segundo impulso                        | Ciclo de carga      | 40 minutos        |
|  | Ciclo de descarga   | 5 minutos         |
|  | Tiempo de operación | 45 minutos        |
| <b>Tiempo total de operación</b>       |                     | <b>90 minutos</b> |

Los resultados de la primera prueba de operación son los siguientes:

Tabla 49. Resultados de la primera operación del sistema

**PRIMER CICLO DE OPERACIÓN**

| t<br>[min]                | Pc<br>[psi] | Pe<br>[psi] | Tc<br>[°C] | Te<br>[°C] | Qac<br>[ml] | Qat<br>[ml] |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 0                         | 360         | 35          | 34,4       | 12,7       | 0           |             |
| 5                         | 360         | 60          | 37,9       | 12,9       | 15          |             |
| 10                        | 420         | 70          | 40,7       | 2,1        | 15          |             |
| 15                        | 430         | 70          | 43,3       | 5,7        | 10          |             |
| 20                        | 440         | 70          | 43,4       | 7,6        | 10          |             |
| 25                        | 440         | 65          | 43,9       | 9,5        | 10          |             |
| 30                        | 430         | 60          | 43,5       | 8          | 5           |             |
| 35                        | 425         | 60          | 42,8       | 9,5        | 0           |             |
| 40                        | 200         | 200         | 29,9       | 17,6       | 0           |             |
| 45                        | 200         | 200         | 29,9       | 17,6       | 0           | 30          |
| <b>PRODUCCIÓN DE AGUA</b> |             |             |            |            | <b>65</b>   | <b>30</b>   |

**SEGUNDO CICLO DE OPERACIÓN**

| t<br>[min]                | Pc<br>[psi] | Pe<br>[psi] | Tc<br>[°C] | Te<br>[°C] | Qac<br>[ml] | Qat<br>[ml] |
|---------------------------|-------------|-------------|------------|------------|-------------|-------------|
| 0                         | 410         | 70          | 37,4       | 12,7       | 0           |             |
| 5                         | 440         | 75          | 42,9       | 12,9       | 15          |             |
| 10                        | 460         | 80          | 42,2       | 2,1        | 5           |             |
| 15                        | 460         | 80          | 43,4       | 5,7        | 5           |             |
| 20                        | 460         | 75          | 44,5       | 7,6        | 5           |             |
| 25                        | 460         | 75          | 44,4       | 9,5        | 5           |             |
| 30                        | 450         | 65          | 43,5       | 8          | 5           |             |
| 35                        | 430         | 60          | 43,5       | 9,5        | 5           |             |
| 40                        | 430         | 60          | 43,5       | 17,6       | 5           |             |
| 45                        | 200         | 200         | 29,9       | 17,6       | 5           | 80          |
| <b>PRODUCCIÓN DE AGUA</b> |             |             |            |            | <b>55</b>   | <b>80</b>   |

|   | Qac           | Qat           |
|---|---------------|---------------|
| <b>PRODUCCIÓN TOTAL DE AGUA (CICLO 1 + 2)</b> | <b>120 ml</b> | <b>110 ml</b> |



|                                    |                              |            |               |
|------------------------------------|------------------------------|------------|---------------|
| <b>EVAPORACIÓN TOTAL DE AGUA</b>   | <b><math>Q_{ac} =</math></b> | <b>120</b> | <b>ml</b>     |
| <b>TIEMPO TOTAL DE EVAPORACIÓN</b> | <b><math>t_{ac} =</math></b> | <b>80</b>  | <b>min</b>    |
| <b>VOLUMEN DE EVAPORACIÓN</b>      | <b><math>E_0 =</math></b>    | <b>1,5</b> | <b>ml/min</b> |

|                                     |                              |            |               |
|-------------------------------------|------------------------------|------------|---------------|
| <b>CONDENSACIÓN TOTAL DE AGUA</b>   | <b><math>Q_{at} =</math></b> | <b>110</b> | <b>ml</b>     |
| <b>TIEMPO TOTAL DE CONDENSACIÓN</b> | <b><math>t_{at} =</math></b> | <b>10</b>  | <b>min</b>    |
| <b>VOLUMEN DE CONDENSACIÓN</b>      | <b><math>C_0 =</math></b>    | <b>11</b>  | <b>ml/min</b> |

| <b>Convenciones</b> |   |
|---------------------|---|
| <b>t:</b>           | Tiempo t, en minutos                                    |
| <b>Pc:</b>          | Presión de condensación del gas refrigerante, en p.s.i. |
| <b>Pe:</b>          | Presión de evaporación del gas refrigerante, en p.s.i.  |
| <b>Tc:</b>          | Temperatura en el condensador, en °C                    |
| <b>Te:</b>          | Temperatura en el evaporador; en °C                     |
| <b>Qac:</b>         | Caudal de agua cruda, en mililitros                     |
| <b>Qat:</b>         | Caudal de agua tratada, en mililitros                   |

De esta primera prueba de operación se pudo determinar que, partiendo de la posición cero (equipo apagado), el sistema requiere de un tiempo de quince (15) minutos para alcanzar la máxima temperatura en el condensador y que corresponde al punto de estabilización del sistema, como se muestra en la siguiente gráfica:

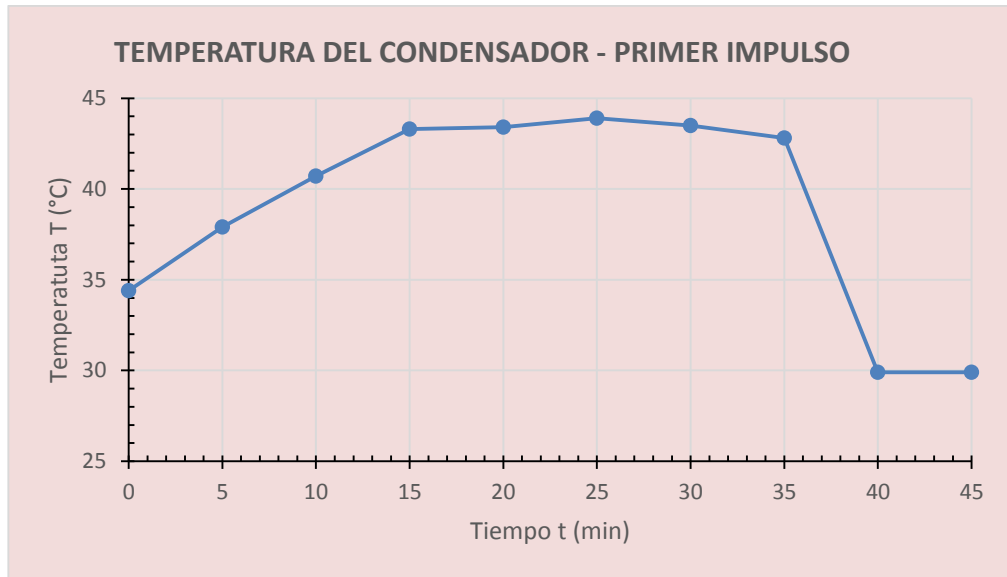


Ilustración 73. Temperatura del Condensador - Primer Impulso

Una vez estabilizado el sistema, solo requiere de un tiempo de cinco (5) minutos después de apagado para volver alcanzar la máxima temperatura en el condensador y que corresponde al punto de estabilización del sistema, como se muestra en la siguiente gráfica:

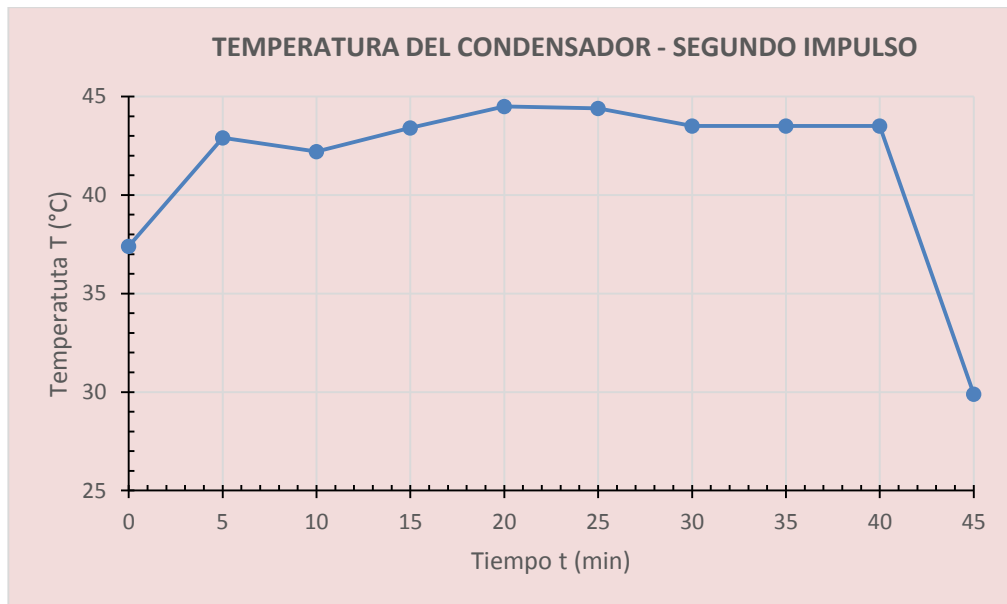


Ilustración 74. Temperatura del Condensador - Segundo Impulso



Con los resultados de evaporación obtenidos se procederá a su comparación con las fórmulas teóricas existentes y de esta manera determinar la diferencia presentada entre las expresiones matemáticas conocidas y los experimentos prácticos realizados. El desarrollo de esta comparación se presenta en el numeral 3.2.5. **Fórmulas de evaporación.**

#### 4.1.2. Resultados de la segunda prueba de operación

Después de múltiples ajustes de las variables involucradas con el fin de optimizar el funcionamiento del equipo, para la segunda prueba de operación del sistema se adoptaron los siguientes parámetros iniciales:

*Tabla 50. Parámetros iniciales de la segunda operación del equipo*

| PARÁMETRO DE OPERACIÓN DEL EQUIPO               |            |
|---|------------|
| Tipo de gas refrigerante utilizado              | R410A      |
| Carga inicial de gas refrigerante en el sistema | 264 gramos |
| Presión de carga inicial de refrigerante        | 200 p.s.i. |
| Temperatura ambiente                            | 20,1 °C    |
| Temperatura del agua cruda                      | 18,5 °C    |
| Sitio de prueba                                 | Bogotá     |
| Humedad relativa                                | 61%        |
| Altitud   | 2640 msnm  |
| Presión atmosférica                             | 560 mmHg   |

Teniendo en cuenta que el equipo funciona al 100% de su capacidad y que en consecuencia el evaporador trabaja también al 100% de su capacidad de enfriamiento, esta segunda prueba de operación se llevará a cabo abasteciendo un caudal de agua cruda superior a la capacidad de evaporación del equipo; esto se hace con el fin de utilizar toda la capacidad de evaporación. El caudal de agua cruda excedente (que no pueda ser

evaporado por el equipo) se constituirá en un caudal de recirculación que será reincorporado al proceso mediante el sistema de recirculación de agua no procesada (ver numeral 2.4.2.5. **Sistema de recirculación de agua no procesada**).

Los resultados de la segunda prueba de operación son los siguientes:

Tabla 51. Resultados de la segunda operación del sistema

| t<br>[min]                          | Pe<br>[psi] | Tcomp<br>[°C] | Tcond<br>[°C] | Tevap<br>[°C] | Qat<br>[ml] |
|-------------------------------------|-------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| 0                                   | 200         | 21,9          | 20,5          | 20,2          | 0           |
| 2                                   | 50          | 28,5          | 27,6          | 3,5           | 0           |
| 4                                   | 80          | 35,1          | 33,9          | 6,2           | 0           |
| 6                                   | 100         | 43,1          | 39,4          | 0,6           | 0           |
| 8                                   | 110         | 51,3          | 43,0          | 2,2           | 0           |
| 10                                  | 115         | 58,7          | 44,5          | 6,2           | 9           |
| 12                                  | 120         | 62,1          | 47,0          | 5,1           | 9           |
| 14                                  | 120         | 64,7          | 48,8          | 6,0           | 9           |
| 16                                  | 125         | 64,7          | 49,8          | 6,6           | 9           |
| 18                                  | 125         | 66,0          | 50,5          | 6,9           | 9           |
| 20                                  | 125         | 67,4          | 51,0          | 7,3           | 9           |
| 22                                  | 125         | 67,4          | 51,5          | 7,6           | 9           |
| 24                                  | 128         | 68,5          | 51,5          | 7,7           | 9           |
| 26                                  | 128         | 68,9          | 51,6          | 7,9           | 9           |
| 28                                  | 130         | 68,9          | 52,0          | 8,0           | 9           |
| 30                                  | 130         | 68,9          | 52,2          | 8,0           | 10          |
| 30                                  | 210         | 68,9          | 52,2          | 8,0           | 0           |
| <b>PRODUCCIÓN DE AGUA</b>           |             |               |               |               | <b>100</b>  |
| <b>CONDENSACIÓN TOTAL DE AGUA</b>   |             |               |               |               |             |
|                                     |             | $Q_{at} =$    | <b>100</b>    | ml            |             |
| <b>TIEMPO TOTAL DE CONDENSACIÓN</b> |             |               |               |               |             |
|                                     |             | $t_{at} =$    | <b>20</b>     | min           |             |
| <b>VOLUMEN DE CONDENSACIÓN</b>      |             |               |               |               |             |
|                                     |             | $C_0 =$       | <b>5</b>      | ml/min        |             |

| Convenciones  |  |
|---------------|--|
| <b>t:</b>     | Tiempo t, en minutos                                   |
| <b>Pe:</b>    | Presión de evaporación del gas refrigerante, en p.s.i. |
| <b>Tcomp:</b> | Temperatura del gas a la salida del compresor, en °C   |
| <b>Tcond:</b> | Temperatura del aire en el condensador, en °C          |
| <b>Tevap:</b> | Temperatura del aire en el evaporador; en °C           |
| <b>Qat:</b>   | Caudal de agua tratada, en mililitros                  |

De esta segunda prueba de operación se pudo determinar que, partiendo de la posición cero (equipo apagado) y con el sistema precargado de gas refrigerante R410A a una presión de 200 p.s.i., una vez se enciende el equipo, la succión realizada por el módulo de compresión hace disminuir la presión del gas a la salida de la unidad evaporadora hasta 50 psi. Con el paso del tiempo, el gas es recirculado en todo el sistema y la presión de operación del gas a la salida de la unidad evaporadora se va estabilizando hasta llegar a su valor óptimo de 120 psi. Llegar a este nivel óptimo de presión le toma al equipo un tiempo de 10 minutos como se muestra en la siguiente gráfica:

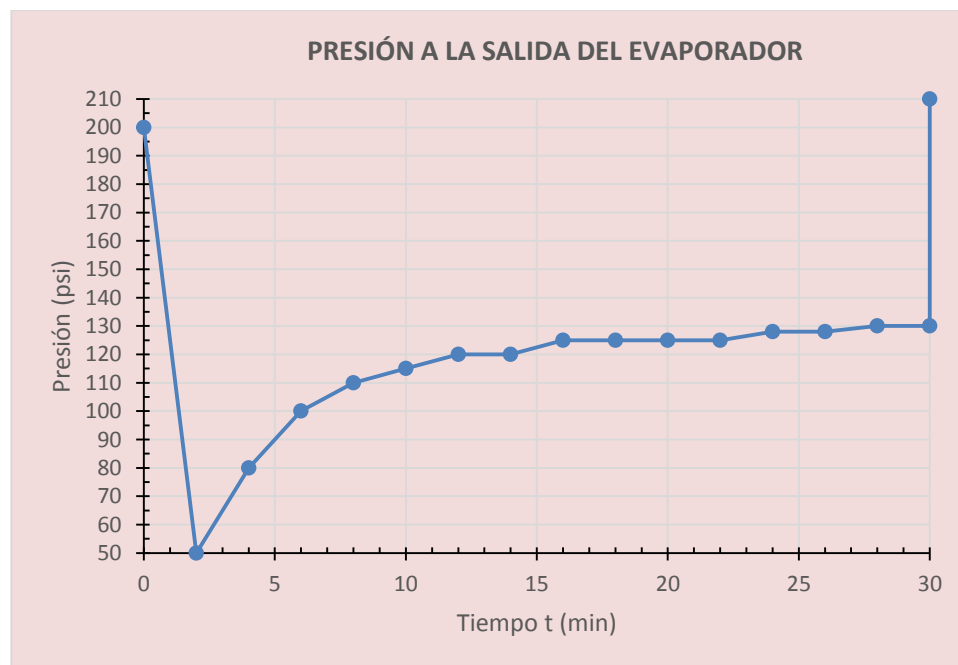


Ilustración 75 - Presión a la salida del evaporador - Segunda prueba

Al evaluar el comportamiento de las temperaturas de operación del sistema, se observa que, partiendo de la posición cero (equipo apagado) y con una temperatura de la tubería de gas R410A a la salida del módulo de compresión de 21,9 °C, muy cercana a la temperatura ambiente (20,1 °C), una vez se enciende el equipo, el módulo de compresión inicia su trabajo de llevar el gas R410A hasta la presión óptima de 120 psi. En este proceso va elevando gradualmente la temperatura del gas hasta llevarla al valor óptimo de 68 °C. Llegar a este nivel óptimo de temperatura le toma al equipo un tiempo de 10 minutos como se muestra en la siguiente gráfica:

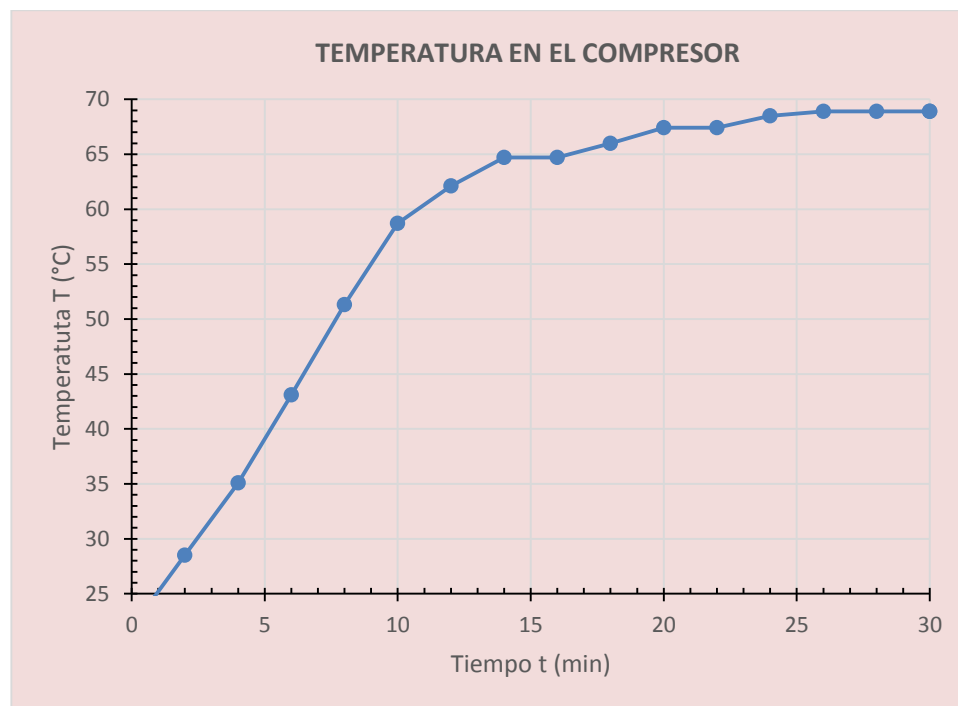


Ilustración 76 - Temperatura a la salida del compresor - Segunda prueba

Este comportamiento es consistente con el comportamiento presentado por la gráfica presión – tiempo a la salida del evaporador que se muestra en la ilustración No. 75, mostrando la relación directa entre la presión y la temperatura del gas.

Al evaluar el comportamiento de la temperatura en la unidad condensadora, se observa que, partiendo de la posición cero (equipo apagado) y con una temperatura del aire a la salida del condensador de 20,5 °C, muy cercana a la temperatura ambiente (20,1 °C), una vez se enciende el equipo, el módulo de compresión inicia su trabajo de llevar el gas R410A hasta la presión óptima de 120 psi. En este proceso va elevando gradualmente la temperatura de la unidad condensadora hasta llevarla al valor óptimo de 51 °C. Llegar a este nivel óptimo de temperatura le toma al equipo un tiempo de 20 minutos como se muestra en la siguiente gráfica:

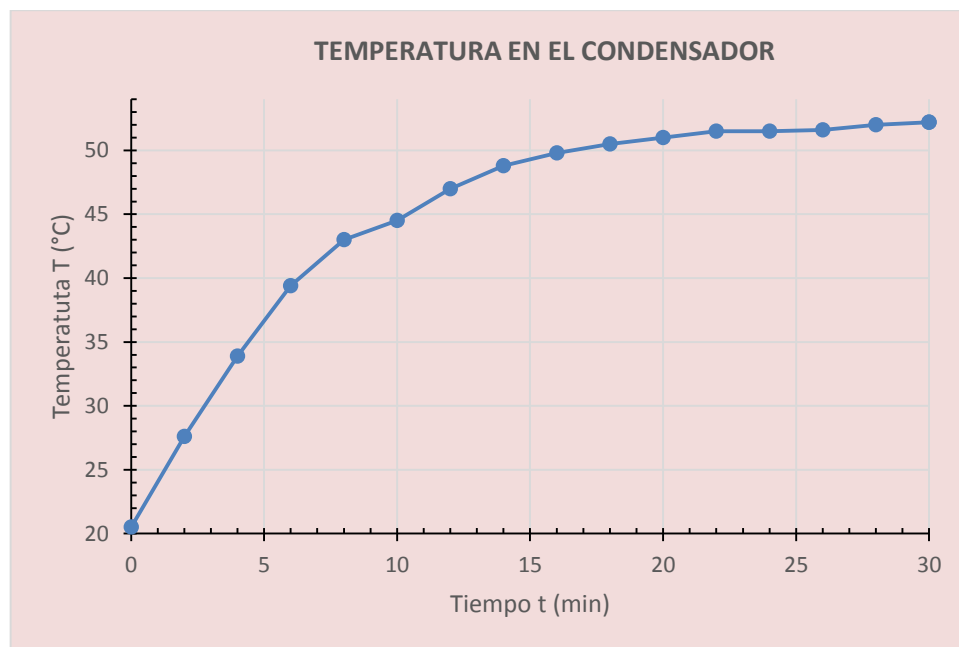


Ilustración 77 - Temperatura del aire en la unidad condensadora - Segunda prueba

Sin embargo, de acuerdo con lo observado en la prueba, el equipo prototipo Evaporador – Condensador comienza su producción de agua tratada a los 10 minutos de iniciada su operación. Esto indica que la temperatura mínima necesaria en la unidad condensadora para dar inicio al proceso de evaporación del agua de mar es de 44,5 °C.

Nótese que, a partir de los 10 minutos de operación, la pendiente de la curva de temperatura del condensador sufre una disminución importante, lo que indica el inicio de llegada a su temperatura óptima. Este comportamiento es consistente con el comportamiento presentado por la gráfica presión – tiempo a la salida del evaporador que se muestra en la ilustración No. 75 y por la gráfica temperatura – tiempo a la salida del compresor que se muestra en la ilustración No. 76.

Finalmente, al evaluar el comportamiento de la temperatura en la unidad evaporadora, se observa que, partiendo de la posición cero (equipo apagado) y con una temperatura del aire a la salida del evaporador de 20,2 °C, muy cercana a la temperatura ambiente (20,1 °C), una vez se enciende el equipo, el módulo de compresión inicia su trabajo y en este proceso va disminuyendo gradualmente la temperatura de la unidad evaporadora hasta llevarla al valor óptimo de 7,3 °C. Llegar a este nivel óptimo de temperatura le toma al equipo un tiempo de 20 minutos como se muestra en la ilustración No. 71.



Ilustración 78 - Temperatura del aire en la unidad evaporadora - Segunda prueba

Sin embargo, de acuerdo con lo observado en la prueba, el equipo prototipo Evaporador – Condensador comienza su producción de agua tratada a los 10 minutos de iniciada su operación. Esto indica que la temperatura necesaria en la unidad evaporadora para dar inicio al proceso de condensación del agua evaporada en la banda absorbente es de 6 °C.

#### **4.1.3. Calidad del agua tratada**

Como ya se indicó, en el capítulo 3, numeral 3.1.2. **Propiedades del agua marina**, la salinidad está definida como la masa, expresada en gramos, de material inorgánico disuelto en 1 kg de agua de mar.

El agua del mar es salada debido a la concentración de sales minerales disueltas que contiene y la concentración de estos componentes en el agua marina presenta muy poca variabilidad, razón por la cual posee una salinidad promedio de 35 ‰ (3.5 %) y su densidad típica a presión atmosférica y a una temperatura media de 20 °C varía entre 1,03 y 1,028 kg/L, siendo el rango más común entre 1,024 y 1,026 kg/L.

Acudiendo al hidrómetro descrito en el capítulo 3, numeral 3.8.5. **Hidrómetro tanque de igualación**, el cual nos permite medir la densidad relativa del agua a tratar y del agua tratada, se obtiene los siguientes resultados:



Ilustración 79 - Salinidad del agua a tratar

Densidad específica: 1,024 kg/L

Salinidad: 32 ppt

**AGUA DE ENTRADA AL EQUIPO**



Ilustración 80 - Salinidad del agua tratada

Densidad específica: 1,000 kg/L

Salinidad: 0 ppt

**AGUA DE SALIDA DEL EQUIPO**

Así, el equipo prototipo Condensador – Evaporador cumple con el objetivo específico de tratar el agua de mar, reduciendo la salinidad desde 32 ppt (partes por mil) hasta 0 ppt (partes por mil).



### 4.1.3. Medición de la evaporación

Según (Monsalve Sáenz, 1999, pág. 161), para determinar la evaporación existen dos tipos de estudios:

- ✚ **Métodos de medida:** Tiene que ver con la construcción de aparatos y métodos para medir los valores reales.
  
- ✚ **Métodos de estimación:** Consiste en la elaboración de fórmulas técnico-empíricas que logren explicar el proceso con la mayor similitud a las condiciones reales.

Como método de medida para determinar los valores reales del fenómeno de la evaporación, en el presente estudio se ha construido y operado el denominado “**Equipo prototipo Evaporador – Condensador para potabilización de agua**”. Los resultados obtenidos se plasman en el capítulo 3.1. **Operación del sistema.**

Se pretende entonces tomar los resultados de los valores de evaporación obtenidos y medidos en el **Equipo Evaporador – Condensador** para compararlos con las siguientes fórmulas de estimación teóricas existentes en el mundo científico y de esta manera determinar el error presentado entre las expresiones matemáticas conocidas y los experimentos prácticos realizados.

#### 4.1.4. Fórmulas de evaporación

##### 4.1.4.1. Método aerodinámico

Este método se fundamenta en la influencia que ejerce el viento sobre la evaporación al producir el arrastre o movimiento de la capa límite. La energía calórica es responsable de la evaporación desde una superficie, pero es el viento el que posee la habilidad para transportar el vapor lejos de la superficie. La ecuación presenta soluciones simples sólo en condiciones definidas, es decir, es apropiada para aplicar en áreas pequeñas con información climatológica detallada.

La tasa de evaporación se calcula de la siguiente manera:

$$E_0 = B(e'_s - e_w)$$
$$B = \frac{0,622K^2 \rho_a \bar{U}}{P_a \rho_w \left[ \ln \left( \frac{Z_2}{Z_0} \right) \right]^2}$$

Donde:

- E<sub>0</sub>: Tasa de evaporación por unidad de tiempo, expresada en m/s
- B: Coeficiente de transferencia de vapor
- e'<sub>s</sub>: Presión de saturación de vapor del aire a temperatura t'<sub>s</sub>
- e<sub>w</sub>: Presión de saturación en la capa límite a temperatura del agua t<sub>w</sub>
- K: Constante de Von Karman K = 0,4
- ρ<sub>a</sub>: Densidad del aire que depende de la temperatura del aire t<sub>a</sub>
- Ū: Velocidad del viento
- P<sub>a</sub>: Presión atmosférica

$\rho_w$ : Densidad del agua a temperatura del agua  $t_w$

$Z_2$ : 2 m

$Z_0$ : Altura de rugosidad de la superficie en m

Para agua:  $Z_0 = 0,0001 - 0,0006$  m

Tabla 52. Valores de altura de rugosidad en superficies naturales

| TIPO DE SUPERFICIE             | ALTURA DE RUGOSIDAD ( $Z_0$ ) (cm) |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Hielo, Fango                   | 0,001                              |
| Agua                           | 0,01 – 0,06                        |
| Pasto (hasta 10 cm de altura)  | 0,1 – 2,0                          |
| Pasto (10 – 50 cm de altura)   | 2 – 5                              |
| Vegetación (1 – 2 m de altura) | 20                                 |
| Árboles (10 – 15 m de altura)  | 40 – 70                            |

Fuente: (Chow, 1994, pág. 46).

Las condiciones de operación del equipo se presentaron en el numeral 4.1.

**Operación del sistema** y se reproducen a continuación:

Temperatura del agua cruda:  $t_w = 18,5$  °C (numeral 4.1. Operación)

Ciudad: Bogotá

Humedad relativa: H.R. = 44 %

Presión atmosférica:  $P_a = 74,611$  Kpa (Tabla 57)

Velocidad del viento:  $\bar{U} = 3,3$  m/s (numeral 3.3.2. Túnel de viento)

Temperatura del aire caliente:  $t'_s = 43,5$  °C (numeral 4.1. Operación)

Densidad del aire caliente:  $\rho_a = 1,1146$  Kg/m<sup>3</sup> (Tabla 59)

Altura de rugosidad:  $Z_0 = 0,0001$  m (Tabla 52)

Presión de saturación de vapor del aire a  $t'_s = 43,5$  °C:

$e'_s = 8,87$  Mpa (Tabla 58)

Entonces:

$$B = \frac{0,622 * 0,4^2 * 1,1146 * 3,3}{74.661 * 998,59 \left[ \ln \left( \frac{2,0}{0,0001} \right) \right]^2} = 5,00594 * 10^{-11} \frac{m}{Pa * s}$$

$$e_w = e'_s * H.R.$$

$$e_w = 8,87 * 0,44 = 3,903 MPa$$

$$E_0 = 5,00594 * 10^{-11} (8'870.000Pa - 3'903.000Pa)$$

$$E_0 = 0,000248655 \frac{m}{s} = 1,492 \frac{cm}{min}$$

Así las cosas, tenemos los siguientes resultados:

|  |         |              |
|--|---------|--------------|
| Evaporación producida por el equipo evaporador – condensador | $E_0 =$ | 1,5 ml/min   |
| Evaporación calculada por el método aerodinámico             | $E_0 =$ | 1,492 cm/min |

Diferencia encontrada:

$$d = 1,5 - 1,492 = 0,008 ml/min$$

Porcentaje de la diferencia:

$$\%d = \frac{1,5 - 1,492}{1,5} = 0,00533 \sim 0,53\%$$

#### 4.1.4.2. Método del balance de energía

Se considera el siguiente volumen de control para desarrollar las ecuaciones de continuidad y de energía aplicable a la evaporación (Chow, 1994, pág. 83):

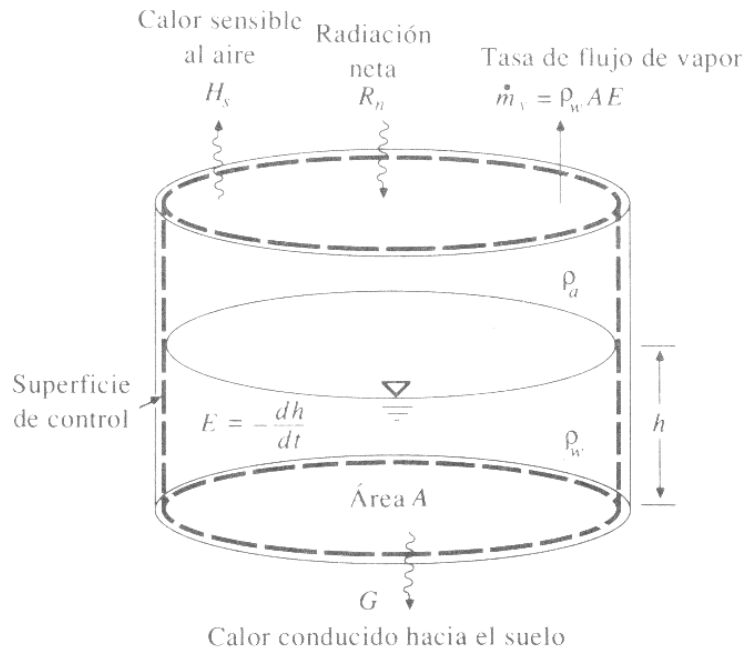


Ilustración 81. Volumen de control para ecuaciones de continuidad y energía

FUENTE: (Chow, 1994, pág. 83)

Ecuación de balance de energía para evaporación:

$$E_0 = \frac{1}{l_v \rho_w} (R_n - H_s - G)$$

Donde:

$E_0$ : Tasa de evaporación por unidad de tiempo, expresada en m/s

$l_v$ : Calor latente de evaporación, expresado en J/Kg

$\rho_w$ : Densidad del agua a temperatura del agua  $t_w$

$R_n$ : Campo de flujo neto de radiación

H<sub>s</sub>: Campo de flujo de calor sensible del agua al aire, se asume cero (0)

G: Campo de flujo de calor sensible del agua al suelo, se asume (0)

En consecuencia:

$$E_0 = \frac{R_n}{l_v \rho_w}$$

$$l_v = 2,501 * 10^6 - 2.370 * T$$

Donde:

l<sub>v</sub>: Calor latente de evaporación, expresado en J/Kg

T: Temperatura del aire, expresada en °K

$$R_n = R_i(1 - \alpha) - R_e$$

Donde:

R<sub>n</sub>: Campo de flujo neto de radiación

α: Albedo, % de radiación incidente R<sub>i</sub> que la superficie del agua refleja

R<sub>e</sub>: Campo de flujo de radiación emitida

$$R_e = e * \sigma * T^4$$

Donde:

e: Emisividad de la superficie

| ELEMENTO | e    |
|----------|------|
| Agua     | 0,97 |
| Aire     | 1,00 |

σ: Constante de Estefan – Boltzmann (5,67\*10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>-K<sup>4</sup>)

T: Temperatura del aire, expresada en °C

Tomando las condiciones de operación del equipo presentadas en el numeral 3.1.

**Operación del sistema:**

Temperatura del aire caliente:  $T = 43,5 \text{ °C} = 316,65 \text{ °K}$

(numeral 4.1. Operación)

Densidad del aire caliente:  $\rho_a = 1,1146 \text{ Kg/m}^3$  (Tabla 59)

Densidad del agua:  $\rho_w = 990,85 \text{ Kg/m}^3$  a  $T = 43,5 \text{ °C}$  (Tabla 60)

Como no hay radiación incidente, entonces:

$$R_n = R_e$$

$$R_n = R_e = e * \sigma * T^4$$

$$R_n = e * \sigma * T^4$$

Calculando para el volumen de aire:

$$R_{n(aire)} = 1,00 * 5,6703 * 10^{-8} * 316,65^4$$

$$R_{n(aire)} = 570,064 \frac{W}{m^2}$$

$$l_v = 2,501 * 10^6 - 2.370 * T$$

$$l_v = 2,501 * 10^6 - 2.370 * 316.65$$

$$l_v = 2,40 * 10^6 \text{ Julios/Kg}$$

$$E_{0(aire)} = \frac{R_n}{l_v \rho_a}$$

$$E_{0(aire)} = \frac{570,064}{2,40 * 10^6 * 1,1146}$$

$$E_{0(aire)} = 2,13 * 10^{-4} \frac{m}{s} = 1,2797 \frac{cm}{min}$$

Calculando para el volumen de agua:

$$R_{n(w)} = 0,97 * 5,6703 * 10^{-8} * 316,65^4$$

$$R_{n(w)} = 552,963 \frac{W}{m^2}$$

$$l_v = 2,501 * 10^6 - 2.370 * T$$

$$l_v = 2,501 * 10^6 - 2.370 * 316.65$$

$$l_v = 2,40 * 10^6 \text{ Julios/Kg}$$

$$E_{0(w)} = \frac{R_n}{l_v \rho_w}$$

$$E_{0(w)} = \frac{552,96}{2,40 * 10^6 * 990,85}$$

$$E_{0(w)} = 2,33 * 10^{-7} \frac{m}{s} = 0,00139 \frac{cm}{min}$$

$$E_{0(T)} = 0,00139 \frac{cm}{min} + 1,2797 \frac{cm}{min}$$

$$E_{0(T)} = 1,2811 \frac{cm}{min}$$



Así las cosas, tenemos los siguientes resultados:

|  |         |               |
|--|---------|---------------|
| Evaporación producida por el equipo evaporador - condensador | $E_0 =$ | 1,5 ml/min    |
| Evaporación calculada por el método del balance de energía   | $E_0 =$ | 1,2811 cm/min |

Diferencia encontrada:

$$d = 1,5 - 1,2811 = 0,2189 \text{ ml/min}$$

Porcentaje de la diferencia:

$$\%d = \frac{1,5 - 1,2811}{1,5} = 0,1459 \sim 14,59\%$$

## Capítulo 5 – Costos de operación del sistema

### 5.1. Demanda nominal de energía eléctrica

Las operaciones unitarias establecidas para el funcionamiento del sistema involucran los siguientes aparatos eléctricos con especificaciones técnicas y requerimientos de energía nominales, según sus catálogos y manuales de operación:

Tabla 53. Demanda nominal de energía de los aparatos eléctricos utilizados

|           |                            |     |                        |         | ESPECIFICACIONES TÉCNICAS<br>(NOMINALES) |                 |                    |                 |                    |
|-----------|----------------------------|-----|------------------------|---------|--|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| #         | OPERACIÓN<br>UNITARIA      | No. | EQUIPO                 | MODELO  | VOLTAJE<br>[V]                           | POTENCIA<br>[W] | FRECUENCIA<br>[Hz] | L.R.A.<br>[Amp] | VELOCIDAD<br>[RPM] |
|           |                            |     |                        |         |  |                 |                    |                 |                    |
| 2.4       | Dosificación de agua cruda | 1   | Bomba sumergible       | NS-160  | 110 - 120                                | 3               | 60                 |                 |                    |
| 2.4       | Dosificación de agua cruda | 2   | Motor banda absorbente |         | 110 - 120                                |                 |                    |                 | 9                  |
| 2.6       | Compresor                  | 3   | Compresor              | 39A121A | 115                                      |                 | 60                 | 26              |                    |
| 2.2 y 2.5 | Condensador y Evaporador   | 4   | Motor ventiladores     | CJ21S   | 115                                      | 21              | 60                 | 0,39            |                    |
| 2.3       | Tunel de viento            | 5   | Resistencia            |         | 110 - 120                                |                 |                    | 3,5             |                    |
|           |                            |     |                        |         |  |                 |                    |                 |                    |

## 5.2. Demanda real de energía eléctrica

Una vez instalados los equipos y puestos en operación, se llevó a cabo las correspondientes mediciones técnicas con el objeto de establecer de forma real y exacta la demanda de energía eléctrica de cada uno de los aparatos eléctricos ya descritos. Los resultados se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 54. Demanda real de energía de los aparatos eléctricos utilizados

| No.                                 | EQUIPO                 | DEMANDA REAL DE ENERGÍA |                    |                                |                            |
|-------------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------|
|                                     |                        | VOLTAJE<br>[V]          | RESISTENCIA<br>[Ω] | INTENSIDAD<br>[Amp]<br>[1]/[2] | POTENCIA<br>[W]<br>[3]*[1] |
|                                     |                        | [1]                     | [2]                | [3]                            | [4]                        |
| 1                                   | Bomba sumergible       | 115,6                   | 212                | 0,0300                         | 3,468                      |
| 2                                   | Motor banda absorbente | 115,6                   | 785                | 0,27                           | 31,212                     |
| 3                                   | Compresor              | 115,6                   | 3,9                | 2,6                            | 300,560                    |
| 4                                   | Motor ventiladores     | 115,6                   | 155,7              | 0,37                           | 42,772                     |
| 5                                   | Resistencia            | 115,6                   | 32,7               | 3,4700                         | 401,132                    |
| <b>POTENCIA TOTAL REQUERIDA (W)</b> |                        |                         |                    |                                | <b>779,144</b>             |

✚ Nota: Los valores medidos de la intensidad de corriente demandada por cada uno de los equipos, no corresponde exactamente con los resultados obtenidos mediante las fórmulas y relaciones establecidas por la Ley de OHM, razón por la cual se optó por trabajar con los datos reales medidos mediante multímetro digital UNII-T UT 202A.

### 5.3. Costos de la energía eléctrica

Establecida la demanda real de energía eléctrica de todo el sistema y confrontándola con los resultados de producción de agua entregados y registrados en el Capítulo 4, numeral 4.1. **Operación del sistema**, se pudo calcular los costos de operación del sistema.

Para establecer el costo de la energía eléctrica, se consultó los valores actualizados del kilovatio en Colombia, publicados en su página de internet por parte de la Empresa ENEL CODENSA para el mes de mayo del año 2021, los valores se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 55. Valores del kilovatio de energía para Colombia en mayo de 2021

| SECTOR RESIDENCIAL NIVEL DE TENSION 1 |                            |                               |                                    |                                   |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| ESTRATO (E)                           | RANGO DE CONSUMO (kWh-mes) | PROPIEDAD DE CODENSA (\$/kWh) | PROPIEDAD DEL CLIENTE (*) (\$/kWh) | PROPIEDAD COMPARTIDA (*) (\$/kWh) |
| E1                                    | 0-CS (+)                   | 229,3407                      | 213,7904                           | 222,0570                          |
|                                       | Más de CS                  | 573,3518                      | 534,4759                           | 555,1426                          |
| E2                                    | 0-CS (+)                   | 286,6759                      | 267,2380                           | 277,5713                          |
|                                       | Más de CS                  | 573,3518                      | 534,4759                           | 555,1426                          |
| E3                                    | 0-CS (+)                   | 487,3490                      | 454,3045                           | 471,8712                          |
|                                       | Más de CS                  | 573,3518                      | 534,4759                           | 555,1426                          |
| E4                                    | Todo consumo               | 573,3518                      | 534,4759                           | 555,1426                          |
| E5                                    | Todo consumo               | 688,0222                      | 641,3711                           | 666,1711                          |
| E6                                    | Todo consumo               | 688,0222                      | 641,3711                           | 666,1711                          |

(+) CS: Consumo de Subsistencia

Fuente: (CODENSA, 2021). Obtenido de: <https://www.codensa.com.co>  
<https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/espaa%20C3%B1ol/personas/1-17-1/2021/Tarifario%20Mayo%202021.pdf>

Finalmente, con toda la información disponible, se calculó el costo de producción de agua potable por cada litro de agua generado por el sistema:

#### 5.4. Costos unitarios de producción de agua tratada

Teniendo en cuenta que, como ya se mencionó, al equipo prototipo Evaporador – Condensador le toma un tiempo de 10 minutos para estabilizarse en su operación y obtener los valores de presión y temperatura óptimos para empezar la producción de agua tratada, los costos asociados a la demanda de energía eléctrica durante ese lapso de tiempo se adoptan como costos fijos, a saber:

Tabla 56. Costos fijos de operación del sistema

| 1 COSTOS FIJOS |                                      |                |                     |                   |                           |                    |                    |                           |                |
|----------------|--------------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------|----------------|
|                | Tiempo de estabilización del equipo: | 10             | min                 |                   |                           |                    |                    |                           |                |
|                |                                      | 0,167          | Hr                  |                   |                           |                    |                    |                           |                |
|                | Producción de agua:                  | 0              | ml                  |                   |                           |                    |                    |                           |                |
|                | Costo energía eléctrica:             | 213,79         | \$/Kw-Hr            |                   |                           |                    |                    |                           |                |
| No.            | EQUIPO                               | POTENCIA       | TIEMPO DE OPERACIÓN | CONSUMO ELÉCTRICO | VALOR UNITARIO DE ENERGÍA | COSTO DE OPERACIÓN | PRODUCCIÓN DE AGUA |                           | COSTO FIJO     |
|                |                                      | [W]            | [Hr]                | [W-Hr]            | [\$/Kw-Hr]                | [\$]               | [cc/Hr]            | [litros/mes]              | [\$/]          |
|                |                                      |                |                     | [1]*[2]           | *                         | ([3]/1000)*[4]     | P/[2]              | [6]*10 <sup>-6</sup> *720 | [5]/[7]        |
|                |                                      | [1]            | [2]                 | [3]               | [4]                       | [5]                | [6]                | [7]                       | [8]            |
| 1              | Bomba sumergible                     | 3,468          | 0,167               | 0,58              | \$213,79                  | \$ 0,12            | 0                  | 0                         | \$0,12         |
| 2              | Motor banda absorbente               | 31,212         | 0,167               | 5,20              | \$213,79                  | \$ 1,11            | 0                  | 0                         | \$1,11         |
| 3              | Compresor                            | 300,560        | 0,167               | 50,09             | \$213,79                  | \$ 10,71           | 0                  | 0                         | \$10,71        |
| 4              | Motor ventiladores                   | 42,772         | 0,167               | 7,13              | \$213,79                  | \$ 1,52            | 0                  | 0                         | \$1,52         |
| 5              | Resistencia                          | 401,13         | 0,167               | 66,86             | \$213,79                  | \$ 14,29           | 0                  | 0                         | \$14,29        |
|                |                                      |                |                     |                   |                           |                    |                    |                           |                |
|                | <b>Todo el sistema</b>               | <b>779,144</b> | <b>0,167</b>        | <b>129,86</b>     | <b>\$213,79</b>           | <b>\$ 27,76</b>    | <b>0</b>           | <b>0</b>                  | <b>\$27,76</b> |

\* Nota: Como valor unitario (\$/K-hora) se tomó el valor de la tarifa vigente publicado por ENEL Codensa para el estrato 1 en un rango de consumo de 0 a 130 Kwh (Consumo de subsistencia)

Una vez el equipo se estabiliza e inicia la producción de agua tratada, los costos unitarios de producción se calculan como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 57 - Costo unitarios de operación del sistema por litro de agua tratada

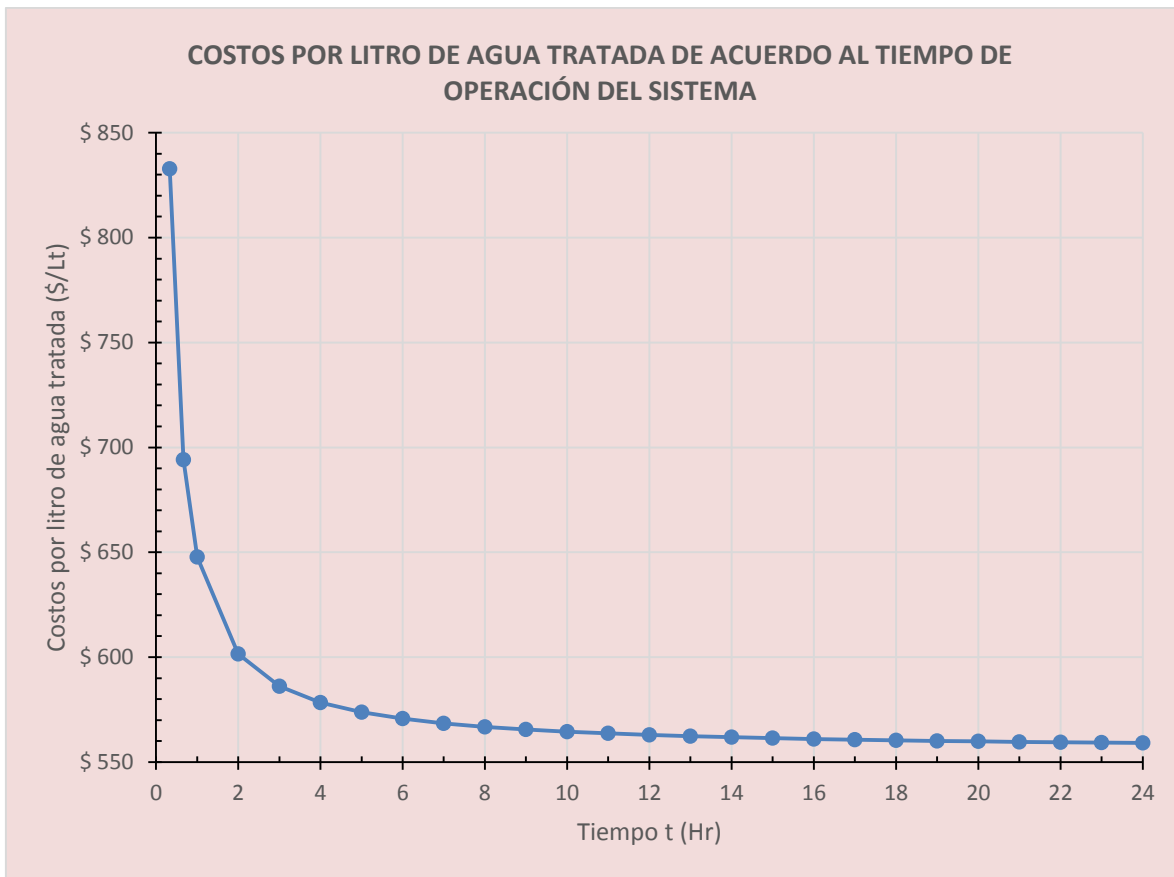
| 2 COSTO POR LITRO DE AGUA TRATADA  |                                 |                |                     |                   |                           |                    |                    |                      |                         |
|--|---------------------------------|----------------|---------------------|-------------------|---------------------------|--------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
|  | Tiempo de operación del equipo: | 20             | min                 |                   |                           |                    |                    |                      |                         |
|  |                                 | 0,333          | Hr                  |                   |                           |                    |                    |                      |                         |
|  | Producción de agua:             | 100            | ml                  |                   |                           |                    |                    |                      |                         |
|  | Costo energía eléctrica:        | 213,79         | \$/Kw-Hr            |                   |                           |                    |                    |                      |                         |
| No.  | EQUIPO                          | POTENCIA       | TIEMPO DE OPERACIÓN | CONSUMO ELÉCTRICO | VALOR UNITARIO DE ENERGÍA | COSTO DE OPERACIÓN | PRODUCCIÓN DE AGUA |                      | COSTO POR LITRO DE AGUA |
|  |                                 | [W]            | [Hr]                | [W-Hr]            | [\$/Kw-Hr]                | [\$]               | [cc]               | [litros]             | [\$/Lt]                 |
|  |                                 |                |                     | [1]*[2]           | *                         | ([3]/1000)*[4]     | P                  | [6]*10 <sup>-6</sup> | [5]/[7]                 |
|  |                                 | [1]            | [2]                 | [3]               | [4]                       | [5]                | [6]                | [7]                  | [8]                     |
| 1  | Bomba sumergible                | 3,468          | 0,333               | 1,156             | \$213,79                  | \$ 0,25            | 100                | 0,1                  | \$2,47                  |
| 2  | Motor banda absorbente          | 31,212         | 0,333               | 10,404            | \$213,79                  | \$ 2,22            | 100                | 0,1                  | \$22,24                 |
| 3  | Compresor                       | 300,560        | 0,333               | 100,186667        | \$213,79                  | \$ 21,42           | 100                | 0,1                  | \$214,19                |
| 4  | Motor ventiladores              | 42,772         | 0,333               | 14,2573333        | \$213,79                  | \$ 3,05            | 100                | 0,1                  | \$30,48                 |
| 5  | Resistencia                     | 401,13         | 0,333               | 133,710667        | \$213,79                  | \$ 28,59           | 100                | 0,1                  | \$285,86                |
|  | <b>Todo el sistema</b>          | <b>779,144</b> | <b>0,333</b>        | <b>259,71</b>     | <b>\$213,79</b>           | <b>\$ 55,52</b>    | <b>100</b>         | <b>0,1</b>           | <b>\$555,24</b>         |
| * Nota: Como valor unitario (\$/K-hora) se tomó el valor de la tarifa vigente publicado por ENEL Codensa para el estrato 1 en un rango de consumo de 0 a 130 Kwh (Consumo de subsistencia) |                                 |                |                     |                   |                           |                    |                    |                      |                         |

Así las cosas, el costo total de producción de agua tratada será la suma de los costos fijos más los costos de producción.

Ahora bien, a mayor tiempo de operación del equipo, los costos fijos se van diluyendo dentro de los costos de producción, como se muestra a continuación:

Tabla 58 - Costos totales de producción por litro de agua tratada

| TIEMPO DE OPERACIÓN | PRODUCCIÓN DE AGUA | COSTOS FIJOS | COSTO POR LITRO DE AGUA | COSTOS DE PRODUCCIÓN | COSTOS TOTALES     | COSTOS POR LITRO DE AGUA TRATADA |                  |
|---------------------|--------------------|--------------|-------------------------|----------------------|--------------------|----------------------------------|------------------|
| [min]               | [Hr]               | [Lt]         | [\$]                    | [\$/Lt]              | [\$]               | [\$/Lt]                          |                  |
|                     | [1]/60             |              |                         |                      | [3]*[5]            | [4]+[6]                          | [7]/[3]          |
| [1]                 | [2]                | [3]          | [4]                     | [5]                  | [6]                | [7]                              | [8]              |
| 20                  | 0,33               | 0,1          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 55,52           | \$ 83,29                         | \$ 832,87        |
| 40                  | 0,67               | 0,2          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 111,05          | \$ 138,81                        | \$ 694,05        |
| 60                  | 1                  | 0,3          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 166,57          | \$ 194,34                        | \$ 647,78        |
| 120                 | 2                  | 0,6          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 333,15          | \$ 360,91                        | \$ 601,51        |
| 180                 | 3                  | 0,9          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 499,72          | \$ 527,48                        | \$ 586,09        |
| 240                 | 4                  | 1,2          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 666,29          | \$ 694,05                        | \$ 578,38        |
| 300                 | 5                  | 1,5          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 832,87          | \$ 860,63                        | \$ 573,75        |
| 360                 | 6                  | 1,8          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 999,44          | \$ 1.027,20                      | \$ 570,67        |
| 420                 | 7                  | 2,1          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 1.166,01        | \$ 1.193,77                      | \$ 568,46        |
| <b>480</b>          | <b>8</b>           | <b>2,4</b>   | <b>\$27,76</b>          | <b>\$555,24</b>      | <b>\$ 1.332,59</b> | <b>\$ 1.360,35</b>               | <b>\$ 566,81</b> |
| 540                 | 9                  | 2,7          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 1.499,16        | \$ 1.526,92                      | \$ 565,53        |
| 600                 | 10                 | 3            | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 1.665,73        | \$ 1.693,49                      | \$ 564,50        |
| 660                 | 11                 | 3,3          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 1.832,31        | \$ 1.860,07                      | \$ 563,66        |
| 720                 | 12                 | 3,6          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 1.998,88        | \$ 2.026,64                      | \$ 562,96        |
| 780                 | 13                 | 3,9          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 2.165,45        | \$ 2.193,21                      | \$ 562,36        |
| 840                 | 14                 | 4,2          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 2.332,02        | \$ 2.359,79                      | \$ 561,85        |
| 900                 | 15                 | 4,5          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 2.498,60        | \$ 2.526,36                      | \$ 561,41        |
| 960                 | 16                 | 4,8          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 2.665,17        | \$ 2.692,93                      | \$ 561,03        |
| 1020                | 17                 | 5,1          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 2.831,74        | \$ 2.859,51                      | \$ 560,69        |
| 1080                | 18                 | 5,4          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 2.998,32        | \$ 3.026,08                      | \$ 560,39        |
| 1140                | 19                 | 5,7          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 3.164,89        | \$ 3.192,65                      | \$ 560,11        |
| 1200                | 20                 | 6            | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 3.331,46        | \$ 3.359,23                      | \$ 559,87        |
| 1260                | 21                 | 6,3          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 3.498,04        | \$ 3.525,80                      | \$ 559,65        |
| 1320                | 22                 | 6,6          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 3.664,61        | \$ 3.692,37                      | \$ 559,45        |
| 1380                | 23                 | 6,9          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 3.831,18        | \$ 3.858,95                      | \$ 559,27        |
| 1440                | 24                 | 7,2          | \$27,76                 | \$555,24             | \$ 3.997,76        | \$ 4.025,52                      | \$ 559,10        |



*Ilustración 82 - Costos por litro de agua tratada Vs. tiempo de operación del equipo*

**Así las cosas, asumiendo un tiempo de operación del Equipo prototipo Evaporador – Condensador de 8 horas diarias, los costos de tratamiento de agua de mar se calculan en \$ 566,81 pesos por litro de agua producida.**



## Capítulo 6 – Optimización de los procesos

Al momento de la elaboración del presente documento se trabaja en el proceso de optimización y ajuste de los parámetros de operación del equipo prototipo EVAPORADOR – CONDENSADOR, con el objetivo de aumentar su rendimiento en la producción de agua, lo que automáticamente reducirá los costos por litro de agua potable producido.

Una de las opciones que se está evaluando es la implementación de una resistencia eléctrica dentro del túnel de viento con el fin de que las corrientes de viento pasen a través de ella recojan el exceso de calor, para sumar esta cantidad de calor al calor ya producido por la unidad condensadora y de esta manera elevar en unos 20°C la temperatura de la masa de aire que circula por el túnel de viento y que impacta de forma transversal la banda absorbente. Esto con el objetivo de mejorar la eficiencia en el proceso de evaporación del agua salada que aumente sensiblemente la producción de agua potable.

Se están realizando pruebas de campo a fin de evaluar si el aumento en los costos de energía eléctrica que implica la inclusión dentro del sistema de la mencionada resistencia eléctrica se justifica al comparar el costo con el beneficio de aumentar el volumen de producción de agua potable.

## Conclusiones

- ✚ El proyecto logró la elaboración de un modelo físico – matemático a escala reducida, que replicó la fracción atmosférica del ciclo hidrológico correspondiente a evaporación, condensación y precipitación.
- ✚ Para este efecto y apoyado en la profundización y aplicación de conocimientos de la hidráulica de fluidos, mecánica de fluidos, hidrología y termodinámica se construyó un equipo prototipo para desalinización de agua que genera los fenómenos de evaporación, condensación y precipitación en un ambiente totalmente controlado.
- ✚ El sistema Evaporador – Condensador construido cuenta con las operaciones unitarias de bombeo inicial, pulverización de agua salada en una banda absorbente, generación de corrientes de aire seco y caliente que evaporen la humedad presente en la banda absorbente, recuperación y recirculación del agua salada no evaporada, cristalización de la humedad arrastrada por las corrientes de aire caliente, fusión de los cristales de agua y finalmente recolección del agua desalinizada producida. El proceso de fabricación y ensamble de cada uno de los elementos que componen las operaciones unitarias mencionadas, se describen plenamente en el **CAPÍTULO 3 – Construcción del equipo prototipo.**

- ✚ Una vez construido y ensamblado el sistema, se puso a trabajar el equipo, registrando detalladamente las variables involucradas y su incidencia en el proceso, así como los resultados obtenidos. Se destaca fundamentalmente en el primer ciclo de operación del equipo que el volumen de agua salada influente fue de 120 mililitros, mientras que el volumen de agua tratada recuperada por el equipo fue del orden de 110 mililitros, en consecuencia, se tiene una tasa de recuperación del líquido del 91,67%.
  
- ✚ Teniendo en cuenta que en este primer ciclo de operación se tenía como uno de los objetivos el poder determinar la tasa de recuperación del líquido procesado y que en consecuencia se debía tener estricto control sobre los caudales de agua entrante y saliente, no se consideró la capacidad máxima total de procesamiento de agua del sistema.
  
- ✚ Bajo estas condiciones, el volumen de agua tratada obtenido durante el primer ciclo de operación del equipo corresponde a 110 ml durante un tiempo de operación de 90 minutos, lo que corresponde a un caudal de agua procesada de 1,22 ml/min.
  
- ✚ Los resultados obtenidos en la operación del equipo prototipo Evaporador – Condensador con respecto del proceso de evaporación fueron comparados con los valores entregados por las fórmulas teórico-prácticas conocidas para el mismo fenómeno, a saber: Método aerodinámico y Método del balance de energía (ver Capítulo 4, numeral 4.2.5.1. **Método aerodinámico** y 4.2.5.2. **Método del balance de energía**). En relación con el Método aerodinámico

el equipo obtuvo una diferencia en los resultados del 0,53 %, mientras que, al comparar el Método del balance de energía, se obtuvo una diferencia en los resultados del 14,59 %.

- ✚ Con el equipo en operación, se llevaron a cabo las correspondientes mediciones técnicas para establecer la demanda de energía eléctrica de cada uno de los aparatos eléctricos involucrados. Como resultado se calculó una potencia total requerida de 794,17 vatios.
- ✚ Teniendo en cuenta el costo de la energía eléctrica determinado por parte de la Empresa ENEL CODENSA para el mes de mayo del año 2019 y para Colombia de \$ 224,2/Kwh, se encontró que para el equipo prototipo Evaporador - Condensador produciendo agua tratada a una tasa de 1,22 ml/min, el costo de operación es de \$ 2.432,42 por litro de agua potable producido.
- ✚ Mediante un proceso iterativo, se trabajó en el proceso de optimización y ajuste de las variables involucradas, así como de los parámetros de operación del equipo prototipo Evaporador – Condensador para su operación al 100% de su capacidad, con el objetivo de aumentar el volumen de producción de agua y, además, con la intención de reducir al mismo tiempo los costos por litro de agua potable producido.
- ✚ Como resultado de este proceso, se logró ajustar los parámetros de operación del sistema hasta lograr obtener -en el segundo ciclo de

operación-, un volumen de producción de agua procesada de 100 ml correspondiente a un tiempo de operación de 20 minutos, lo que significa a un caudal de agua procesada de 5,0 ml/min.

- ✚ Con los parámetros ajustados, se llevaron a cabo las correspondientes mediciones técnicas para establecer la demanda de energía eléctrica de cada uno de los aparatos eléctricos involucrados. Como resultado de este segundo ciclo de operación se calculó una potencia total requerida de 779,144 vatios, es decir que se obtuvo una reducción en la demanda total de energía de 15,026 vatios.
- ✚ Se pudo establecer que, a partir del encendido inicial, al equipo prototipo Evaporador – Condensador le toma un tiempo de 10 minutos para estabilizarse en su operación y obtener los valores de presión y temperatura óptimos para empezar la producción de agua tratada. De esta manera y teniendo en cuenta el costo de la energía eléctrica determinado por parte de la Empresa ENEL CODENSA para el mes de mayo del año 2021 y para Colombia de \$ 213,79/Kwh, se calculó el costo de la demanda de energía del equipo en ese período de 10 minutos en un valor de \$ 27,76. A este valor se le denomina “costos fijos de operación”.
- ✚ Teniendo en cuenta el costo de la energía eléctrica determinado por parte de la Empresa ENEL CODENSA para el mes de mayo del año 2021 y para Colombia de \$ 213,79/Kwh, y operando el equipo de manera óptima, se encontró que para el equipo prototipo Evaporador – Condensador,

produciendo agua tratada a una tasa de 5 ml/min, el costo de operación es de \$ 555,24 por litro de agua potable producido.

- ✚ Sumando los costos fijos y los costos de producción, asumiendo un tiempo de operación del equipo de 8 horas diarias, el costo final de producción de agua desalinizada asciende al valor de \$ 566,81 por litro de agua de mar desalinizada.
- ✚ El agua de mar a tratar que ingresa al equipo prototipo Evaporador – Condensador tiene una densidad específica de 1,024 kg/L equivalente a una salinidad de 32 ppt. Después de pasar por el proceso de tratamiento, el agua tratada presentó una densidad específica de 1,000 kg/L equivalente a una salinidad menor a 4 ppt. El proceso de tratamiento implementado es efectivo en la reducción la salinidad de agua de mar.
- ✚ El equipo prototipo Evaporador – Condensador muestra resultados iniciales prometedores en un enfoque radicalmente distinto para la producción de agua potable a partir de agua de mar. Una vez se logre reducir los costos de operación del sistema a niveles económicamente rentables, se puede pensar en escalar el proyecto para producción de agua para poblaciones costeras e insulares, lo que ayudaría a disminuir la vulnerabilidad de estos territorios frente a los impactos negativos de los fenómenos climáticos, aumentando la capacidad de las comunidades de resistir los eventos extremos y recuperarse tras éstos.

## Bibliografía

- Agua pura y sana. (09 de Septiembre de 2017). <https://aguapuraysana.com>. Obtenido de <https://aguapuraysana.com: https://aguapuraysana.com/destilacion-de-agua-un-proceso-natural/>
- alfalaval. (13 de 11 de 2020). <https://www.alfalaval.es/>. Obtenido de <https://www.alfalaval.es/: https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones/>
- Arveng training & engineering. (13 de 7 de 2020). <https://arvengtraining.com/>. Obtenido de <https://arvengtraining.com/: https://arvengtraining.com/fundamentos-de-intercambiadores-de-ct/>
- Ayut, D. (28 de mayo de 2006). <http://www.acanmet.org>. Obtenido de <http://www.acanmet.org: http://www.acanmet.org/foro/viewtopic.php?t=4548>
- British Broadcasting Corporation. (22 de marzo de 2017). <https://www.bbc.com>. Obtenido de <https://www.bbc.com: https://www.bbc.com/mundo/noticias-39332148>
- Carbotécnica. (4 de octubre de 2019). <https://www.carbotecnia.info/>. Obtenido de <https://www.carbotecnia.info/: https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-la-osmosis-inversa/>
- Chow, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Bogotá: McGRAW-HILL.
- CIIFEN. (1 de diciembre de 2014). <http://www.ciifen.org>. Obtenido de <http://www.ciifen.org:>

[http://www.ciifen.org/index.php?option=com\\_content&view=article&id=573:variabilidad-climatica-y-extremos&catid=98:contenido-1&Itemid=131&lang=es](http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=article&id=573:variabilidad-climatica-y-extremos&catid=98:contenido-1&Itemid=131&lang=es)

*climasmonterrey.com*. (18 de 12 de 2018). Obtenido de *climasmonterrey.com*:  
<https://www.climasmonterrey.com/>

CODENSA, E. (2021). <https://www.codensa.com.co>. Obtenido de  
<https://www.codensa.com.co/hogar/valor-del-kilovatio-en-colombia-disminuye>

Condorchem Envitech. (1 de 03 de 2019). <https://blog.condorchem.com/>. Obtenido de  
<https://blog.condorchem.com/>: <https://blog.condorchem.com/desalacion-de-agua/#que-es>

Desalinización del Agua. (3 de octubre de 2017).  
<http://desalinizandoelaguakvp.blogspot.com/>. Obtenido de  
<http://desalinizandoelaguakvp.blogspot.com/>:  
<http://desalinizandoelaguakvp.blogspot.com/p/congelacion.html>

Durango Padilla, N. N. (2016). *Diseño de Sistemas Termofluidos*. Barranquilla: Universidad del Norte.

El motor de combustion interna. (7 de 3 de 2019).  
<https://elmotordecombustion.blogspot.com/>. Obtenido de  
<https://elmotordecombustion.blogspot.com/>:  
<https://elmotordecombustion.blogspot.com/2019/11/sistema-de-refrigeracion-de-los-motores.html>



Fermi, W. (1 de Mayo de 2015). <https://www.youtube.com>. Obtenido de [https://www.youtube.com: https://www.youtube.com/watch?v=2LQtQnW0a4I](https://www.youtube.com/watch?v=2LQtQnW0a4I)

Fofonoff N.P. & R.C. Millard Jr. (1983). Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Unesco thecnical papers in marine science No. 44*.

Future Cities. (28 de 08 de 2016). <http://www.futurecities.nl>. Obtenido de <http://www.futurecities.nl>: <http://www.futurecities.nl/es/people/maura-es/>

Gas Servei. (31 de 10 de 2019). <https://www.gas-servei.com/>. Obtenido de <https://www.gas-servei.com/>: <https://www.gas-servei.com/images/Ficha-tecnica-R410A.pdf>

Hidrología Sostenible. (30 de 3 de 2016). <http://hidrologiasostenible.com>. Obtenido de <http://hidrologiasostenible.com>: <http://hidrologiasostenible.com/evapora-agua-del-mar-100-grados/>

<http://aulavirtual.usal.es>. (28 de Diciembre de 2018). Obtenido de <http://aulavirtual.usal.es>: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/quimica/modulos/curso/uni\\_01/u1c1s2.htm#Anchor8](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/quimica/modulos/curso/uni_01/u1c1s2.htm#Anchor8)

<http://en.aviagen.com/>. (18 de 12 de 2018). Obtenido de <http://en.aviagen.com/>: [http://en.aviagen.com/assets/Tech\\_Center/BB\\_Foreign\\_Language\\_Docs/Spanish\\_TechDocs/Hot-Tos-ES/AVIAVentHowTo03-FanCapacity-ES16.pdf](http://en.aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Spanish_TechDocs/Hot-Tos-ES/AVIAVentHowTo03-FanCapacity-ES16.pdf)

<https://docplayer.es/>. (1 de 1 de 2000). Obtenido de <https://docplayer.es/>: <https://docplayer.es/16323222-Xix-economizadores-y-calentadores-de-aire.html>

<https://es.wikipedia.org>. (3 de Diciembre de 2018). Obtenido de <https://es.wikipedia.org>:

[https://es.wikipedia.org/wiki/Agua\\_de\\_mar](https://es.wikipedia.org/wiki/Agua_de_mar)

IPCC, Intergovernmental panel on climate change. (1 de diciembre de 2014).

<http://www.ipcc.ch>. Obtenido de <http://www.ipcc.ch>: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>

JNC J. Negre C., S.L. (2 de 9 de 2020). <https://jnegre.com/>. Obtenido de <https://jnegre.com/>:

<https://jnegre.com/producto/intercambiador-en-espiral/>

La Guía Química. (15 de 11 de 2010). <https://quimica.laguia2000.com/>. Obtenido de

<https://quimica.laguia2000.com/>: <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/electrodialisis>

leroymerlin.es. (2019). [https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Bricopedia-](https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Bricopedia-Iluminaci%C3%B3n-y/Qu%C3%A9-es-un-compresor-de-aire-el%C3%A9ctrico/tap/5339)

[Iluminaci%C3%B3n-y/Qu%C3%A9-es-un-compresor-de-aire-el%C3%A9ctrico/tap/5339](https://comunidad.leroymerlin.es/t5/Bricopedia-Iluminaci%C3%B3n-y/Qu%C3%A9-es-un-compresor-de-aire-el%C3%A9ctrico/tap/5339).

MAPAS DEL MUNDO DE KÖPPEN-GEIGER CLASIFICACIÓN DEL CLIMA, Institute

for Veterinary Public Health – vetmeduni, vienna. (1 de diciembre de 2014).

<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at>. Obtenido de <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at>: <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/shifts.htm>

MINTIC MINEDUCACIÓN. (1 de diciembre de 2014).

<http://aprende.colombiaaprende.edu.co/>. Obtenido de

<http://aprende.colombiaaprende.edu.co/>:

[http://aprende.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/naspublic/curriculos\\_ex/n2g10\\_cienamb/nivel2/ciencias/unidad2/leccion2.html](http://aprende.colombiaaprende.edu.co/sites/default/files/naspublic/curriculos_ex/n2g10_cienamb/nivel2/ciencias/unidad2/leccion2.html)

Monsalve Sáenz, G. (1999). *HIDROLOGÍA EN LA INGENIERÍA*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Moreno, A. R. (4 de octubre de 2019). <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-4-4>. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-4-4>: <http://www.mailxmail.com/curso-agua-desalacion-4-4/procesos-desalacion-formacion-hidratos-destilacion-membranas>

NIST, Special Publication 811. (2008). *Guide for the Use of the International System of Units (SI)*. Washington D.C.: U.S. Department of Commerce.

pinterest. (13 de 7 de 2020). <https://www.pinterest.es/>. Obtenido de <https://www.pinterest.es/>: <https://www.pinterest.es/pin/734438651726893182/>

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD, El cambio climático en Colombia – Revisión de riesgos y oportunidades asociados al cambio climático. (2 de diciembre de 2014). <http://www.pnud.org.co>. Obtenido de <http://www.pnud.org.co>: [http://www.pnud.org.co/img\\_upload/61626461626434343535373737353535/Brochure%20resumen%20Proyecto.pdf](http://www.pnud.org.co/img_upload/61626461626434343535373737353535/Brochure%20resumen%20Proyecto.pdf)

Puerto, E. A. (8 de 12 de 2018). <https://efrainpuerto.wordpress.com>. Obtenido de <https://efrainpuerto.wordpress.com>: <https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>

pxhere. (31 de 10 de 2019). <https://pxhere.com>. Obtenido de <https://pxhere.com>: <https://pxhere.com/es/photo/505882>

Refrigeración del Sur. (4 de 4 de 2018). <http://refrigeraciondelsur.blogspot.com/>. Obtenido de <http://refrigeraciondelsur.blogspot.com/>: <http://refrigeraciondelsur.blogspot.com/2018/04/pdfvideo-sobre-ciclo-de.html>

Rodríguez, Á. (30 de marzo de 2016). <https://cienciaes.com>. Obtenido de <https://cienciaes.com>: <https://cienciaes.com/ciencianuestra/2010/04/24/ropa-seca/>

S&P Sistemas de ventilación. (18 de 12 de 2018). Obtenido de S&P Sistemas de ventilación: <https://www.solerpalau.com/>

Sancho, J. (28 de Diciembre de 2018). <http://www.bifi.es>. Obtenido de <http://www.bifi.es>: <http://www.bifi.es/~jsancho/estructuramacromoleculas/1aguaylasmembranasbiologicas/1aguaymembranasbiologicas.htm>

Santibañez, C. A. (28 de Diciembre de 2018). <https://es.scribd.com>. Obtenido de <https://es.scribd.com>: <https://es.scribd.com/doc/94148509/Densidad-del-agua-entre-0-y-100-C>

Sitio Solar. (17 de agosto de 2014). <http://www.sitiosolar.com/>. Obtenido de <http://www.sitiosolar.com/>: <http://www.sitiosolar.com/los-destiladores-solares/>

Toldos Ourense. (13 de 4 de 2016). <https://www.toldosourense.com>. Obtenido de <https://www.toldosourense.com>: <https://www.toldosourense.com/blog/cubretendederos-por-que-es-recomendable-instalarlos/>

Wirz, D. (2008). *Refrigeración Comercial para técnicos de aire acondicionado*. Madrid: Paraninfo.



## Apéndice A

Tabla 59. Presión atmosférica de las capitales de Colombia

| CIUDAD               | ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR<br>(m.s.n.m.) | PRESIÓN ATMOSFÉRICA |         |
|----------------------|---|---------------------|---------|
|                      |   | (mmHg)              | (Kpa)   |
| Arauca               | 119   | 749                 | 99,858  |
| Armenia              | 1551  | 640                 | 85,326  |
| Barranquilla         | 30  | 757                 | 100,925 |
| Bogotá               | 2640  | 560                 | 74,661  |
| Bucaramanga          | 959   | 680                 | 90,659  |
| Cali                 | 995   | 670                 | 89,326  |
| Cartagena            | 0   | 760                 | 101,325 |
| Cúcuta               | 320   | 720                 | 95,992  |
| Florencia            | 242   | 738                 | 98,392  |
| Ibagué               | 1285  | 651                 | 86,793  |
| Leticia              | 96  | 751                 | 100,125 |
| Manizales            | 2160  | 585                 | 77,994  |
| Medellín             | 1538  | 640                 | 85,326  |
| Mitú                 | 200   | 742                 | 98,925  |
| Mocoa                | 590   | 708                 | 94,392  |
| Montería             | 18  | 758                 | 101,058 |
| Neiva                | 442   | 721                 | 96,125  |
| Pereira              | 1411  | 637                 | 84,926  |
| Popayán              | 1760  | 600                 | 79,993  |
| Puerto Carreño       | 51  | 755                 | 100,658 |
| Puerto Inírida       | 95  | 747                 | 99,592  |
| Quibdó               | 43  | 756                 | 100,792 |
| Riohacha             | 0   | 760                 | 101,325 |
| San Andrés           | 0   | 760                 | 101,325 |
| San José de Guaviare | 175   | 744                 | 99,192  |
| San Juan de Pasto    | 2527  | 564                 | 75,194  |
| Santa Marta          | 3   | 760                 | 101,325 |
| Sincelejo            | 213   | 741                 | 98,792  |
| Tunja                | 2810  | 550                 | 73,327  |
| Valledupar           | 169   | 745                 | 99,325  |
| Villavicencio        | 467   | 719                 | 95,859  |
| Yopal                | 350   | 729                 | 97,192  |

Fuente: (Puerto, 2018). Obtenido de: <https://efrainpuerto.wordpress.com/2011/02/26/f1-2/>

Tabla 60. Propiedades del vapor de agua saturado

| Temp. de Saturación °C | Presión de Vapor (Absoluta) |        | Volumen Específico m³/kg | Peso del Vapor |                  |             | Entalpia kcal/kg |         |        |
|------------------------|-----------------------------|--------|--------------------------|----------------|------------------|-------------|------------------|---------|--------|
|                        | kPa                         | psia   |                          | Densidad kg/m³ | Humedad Absoluta |             | Sensible         | Latente | Total  |
|                        |                             |        |                          |                | g/m³             | granos/pie³ |                  |         |        |
| 0                      | 0.61                        | 0.0885 | 206.32                   | 0.004847       | 4.84             | 2.11        | 0                | 597.66  | 597.66 |
| 1                      | 0.65                        | 0.0945 | 194.10                   | 0.005152       | 5.15             | 2.25        | 1                | 596.87  | 597.87 |
| 2                      | 0.7                         | 0.1023 | 179.58                   | 0.005569       | 5.57             | 2.43        | 2                | 596.28  | 598.28 |
| 3                      | 0.76                        | 0.1098 | 168.18                   | 0.005946       | 5.95             | 2.60        | 3                | 595.68  | 298.68 |
| 4                      | 0.81                        | 0.1179 | 157.40                   | 0.006353       | 6.35             | 2.77        | 4                | 595.09  | 599.09 |
| 5                      | 0.87                        | 0.1265 | 147.14                   | 0.006796       | 6.79             | 2.97        | 5                | 594.53  | 599.53 |
| 6                      | 0.93                        | 0.1356 | 137.74                   | 0.007260       | 7.26             | 3.18        | 6                | 593.93  | 599.93 |
| 7                      | 1.00                        | 0.1452 | 129.04                   | 0.007750       | 7.75             | 3.38        | 7                | 593.37  | 600.37 |
| 8                      | 1.07                        | 0.1556 | 120.95                   | 0.008268       | 8.27             | 3.61        | 8                | 592.79  | 600.79 |
| 9                      | 1.15                        | 0.1664 | 113.39                   | 0.008819       | 8.82             | 3.85        | 9                | 592.25  | 601.25 |
| 10                     | 1.23                        | 0.1780 | 106.37                   | 0.009401       | 9.40             | 4.10        | 10               | 292.03  | 602.03 |
| 11                     | 1.31                        | 0.1903 | 99.90                    | 0.01001        | 10.01            | 4.37        | 11               | 591.10  | 602.10 |
| 12                     | 1.40                        | 0.2033 | 93.82                    | 0.01066        | 10.66            | 4.66        | 12               | 590.56  | 602.56 |
| 13                     | 1.50                        | 0.2187 | 88.13                    | 0.01135        | 11.35            | 4.96        | 13               | 589.98  | 602.98 |
| 14                     | 1.60                        | 0.2317 | 82.85                    | 0.01207        | 12.07            | 5.27        | 14               | 589.41  | 603.41 |
| 15                     | 1.70                        | 0.2472 | 77.97                    | 0.01283        | 12.83            | 5.60        | 15               | 588.87  | 603.87 |
| 16                     | 1.82                        | 0.2636 | 73.35                    | 0.01363        | 13.63            | 5.96        | 16               | 588.31  | 604.31 |
| 17                     | 1.94                        | 0.2809 | 69.09                    | 0.01447        | 14.47            | 6.32        | 17               | 587.72  | 604.72 |
| 18                     | 2.06                        | 0.2992 | 65.07                    | 0.01537        | 15.37            | 6.72        | 18               | 587.18  | 605.18 |
| 19                     | 2.20                        | 0.3186 | 61.32                    | 0.01631        | 16.31            | 7.13        | 19               | 586.59  | 605.59 |
| 20                     | 2.33                        | 0.3390 | 57.81                    | 0.01730        | 17.30            | 7.56        | 20               | 586.03  | 606.03 |
| 21                     | 2.48                        | 0.3606 | 54.54                    | 0.01834        | 18.34            | 8.01        | 21               | 585.48  | 606.48 |
| 22                     | 2.64                        | 0.3834 | 51.48                    | 0.01943        | 19.43            | 8.48        | 22               | 584.89  | 606.89 |
| 23                     | 2.83                        | 0.4102 | 48.60                    | 0.02058        | 20.58            | 8.99        | 23               | 584.34  | 607.34 |
| 24                     | 2.98                        | 0.4327 | 45.91                    | 0.02178        | 21.78            | 9.52        | 24               | 583.76  | 607.76 |
| 25                     | 3.16                        | 0.4593 | 43.38                    | 0.02305        | 23.05            | 10.07       | 25               | 583.20  | 608.20 |
| 26                     | 3.36                        | 0.4875 | 41.02                    | 0.02438        | 24.38            | 10.65       | 26               | 582.65  | 608.65 |
| 27                     | 3.56                        | 0.5171 | 38.80                    | 0.02577        | 25.77            | 11.26       | 27               | 582.09  | 609.09 |
| 28                     | 3.78                        | 0.5482 | 36.72                    | 0.02723        | 27.23            | 11.90       | 28               | 581.45  | 609.45 |
| 29                     | 4.00                        | 0.5810 | 34.76                    | 0.02876        | 28.76            | 12.57       | 29               | 580.93  | 609.93 |
| 30                     | 4.24                        | 0.6154 | 32.91                    | 0.03038        | 30.38            | 13.27       | 30               | 580.43  | 610.43 |
| 31                     | 4.49                        | 0.6517 | 31.18                    | 0.03207        | 32.07            | 14.01       | 31               | 579.87  | 610.87 |
| 32                     | 4.75                        | 0.6897 | 29.56                    | 0.03383        | 33.83            | 14.78       | 32               | 579.28  | 611.28 |
| 33                     | 5.03                        | 0.7297 | 28.03                    | 0.03568        | 35.68            | 15.59       | 33               | 578.74  | 611.74 |
| 34                     | 5.32                        | 0.7717 | 26.59                    | 0.03761        | 37.61            | 16.43       | 34               | 578.15  | 612.15 |
| 35                     | 5.62                        | 0.8157 | 25.23                    | 0.03964        | 39.64            | 17.32       | 35               | 577.59  | 612.59 |
| 36                     | 5.94                        | 0.8619 | 23.96                    | 0.04174        | 41.74            | 18.24       | 36               | 576.99  | 612.99 |
| 37                     | 6.27                        | 0.9104 | 22.88                    | 0.04370        | 43.70            | 19.09       | 37               | 576.45  | 613.45 |
| 38                     | 6.63                        | 0.9612 | 21.62                    | 0.04625        | 46.25            | 20.21       | 38               | 575.87  | 613.87 |
| 39                     | 6.99                        | 1.0144 | 20.55                    | 0.04866        | 48.66            | 21.26       | 39               | 575.30  | 614.30 |
| 40                     | 7.38                        | 1.0700 | 19.54                    | 0.05118        | 51.18            | 22.36       | 40               | 574.70  | 614.70 |
| 41                     | 7.78                        | 1.1285 | 18.58                    | 0.05382        | 53.82            | 23.52       | 41               | 574.16  | 615.16 |
| 42                     | 8.08                        | 1.1723 | 17.69                    | 0.05653        | 56.53            | 24.70       | 42               | 573.59  | 615.59 |
| 43                     | 8.64                        | 1.2536 | 16.83                    | 0.05942        | 59.42            | 25.97       | 43               | 573.08  | 616.08 |
| 44                     | 9.10                        | 1.3204 | 16.03                    | 0.06238        | 62.38            | 27.26       | 44               | 572.42  | 616.42 |
| 45                     | 9.58                        | 1.3903 | 15.27                    | 0.06549        | 65.49            | 28.62       | 45               | 571.87  | 616.87 |
| 46                     | 10.09                       | 1.4634 | 14.55                    | 0.06873        | 68.73            | 30.03       | 46               | 571.27  | 617.27 |
| 47                     | 10.62                       | 1.5398 | 13.88                    | 0.07205        | 72.05            | 31.48       | 47               | 570.72  | 617.72 |
| 48                     | 11.17                       | 1.6196 | 13.02                    | 0.07680        | 76.80            | 33.56       | 48               | 570.13  | 618.13 |
| 49                     | 11.75                       | 1.7024 | 12.42                    | 0.08052        | 80.52            | 35.18       | 49               | 569.59  | 618.59 |

Fuente: (climasmonterrey.com, 2018). Obtenido de:  
<https://www.climasmonterrey.com/cuales-son-las-propiedades-del-vapor-de-agua-humedad>

Tabla 61. Propiedades del aire seco a presión atmosférica

| TEMP.<br>°C | Volumen Específico | Densidad | Entalpía  | TEMP.<br>°C | Volumen Específico | Densidad | Entalpía  |
|-------------|--------------------|----------|-----------|-------------|--------------------|----------|-----------|
|             | (m³/kg)            | (kg/m³)  | (kcal/kg) |             | (m³/kg)            | (kg/m³)  | (kcal/kg) |
| -15         | 0.7304             | 1.3691   | 0.6722    | 18          | 0.8244             | 1.2130   | 8.6372    |
| -14         | 0.7332             | 1.3638   | 0.9123    | 19          | 0.8274             | 1.2086   | 8.8772    |
| -13         | 0.7363             | 1.3581   | 1.1523    | 20          | 0.8302             | 1.2044   | 9.1228    |
| -12         | 0.7391             | 1.3530   | 1.3923    | 21          | 0.8329             | 1.2006   | 9.3628    |
| -11         | 0.7422             | 1.3473   | 1.6323    | 22          | 0.8360             | 1.1961   | 9.6028    |
| -10         | 0.7453             | 1.3416   | 1.8779    | 23          | 0.8389             | 1.1920   | 9.8484    |
| -9          | 0.7480             | 1.3369   | 2.1179    | 24          | 0.8418             | 1.1880   | 10.0706   |
| -8          | 0.7511             | 1.3313   | 2.3579    | 25          | 0.8446             | 1.1839   | 10.3284   |
| -7          | 0.7538             | 1.3266   | 2.5980    | 26          | 0.8474             | 1.1800   | 10.5740   |
| -6          | 0.7563             | 1.3222   | 2.8390    | 27          | 0.8501             | 1.1763   | 10.7640   |
| -5          | 0.7591             | 1.3173   | 3.0835    | 28          | 0.8529             | 1.1725   | 11.0540   |
| -4          | 0.7619             | 1.3125   | 3.3235    | 29          | 0.8556             | 1.1687   | 11.2996   |
| -3          | 0.7650             | 1.3072   | 3.5636    | 30          | 0.8583             | 1.1650   | 11.5396   |
| -2          | 0.7678             | 1.3024   | 3.8036    | 31          | 0.8612             | 1.1611   | 11.7796   |
| -1          | 0.7706             | 1.2977   | 4.0447    | 32          | 0.8645             | 1.1567   | 12.0252   |
| 0           | 0.7734             | 1.2928   | 4.2892    | 33          | 0.8672             | 1.1531   | 12.2652   |
| 1           | 0.7756             | 1.2893   | 4.5292    | 34          | 0.8700             | 1.1494   | 12.5052   |
| 2           | 0.7790             | 1.2837   | 4.7692    | 35          | 0.8727             | 1.1458   | 12.7564   |
| 3           | 0.7822             | 1.2784   | 5.0148    | 36          | 0.8756             | 1.1420   | 12.9908   |
| 4           | 0.7850             | 1.2739   | 5.2547    | 37          | 0.8786             | 1.1382   | 13.2308   |
| 5           | 0.7878             | 1.2693   | 5.4948    | 38          | 0.8816             | 1.1343   | 13.4764   |
| 6           | 0.7908             | 1.2645   | 5.7404    | 39          | 0.8843             | 1.1308   | 13.7164   |
| 7           | 0.7933             | 1.2605   | 5.9803    | 40          | 0.8871             | 1.1273   | 13.9620   |
| 8           | 0.7961             | 1.2562   | 6.2204    | 41          | 0.8900             | 1.1236   | 14.2020   |
| 9           | 0.7988             | 1.2518   | 6.4615    | 42          | 0.8932             | 1.1196   | 14.4420   |
| 10          | 0.8015             | 1.2476   | 6.7060    | 43          | 0.8957             | 1.1164   | 14.6820   |
| 11          | 0.8044             | 1.2431   | 6.9460    | 44          | 0.8987             | 1.1127   | 14.9276   |
| 12          | 0.8076             | 1.2381   | 7.1860    | 45          | 0.9014             | 1.1093   | 15.1676   |
| 13          | 0.8104             | 1.2339   | 7.3983    | 46          | 0.9042             | 1.1059   | 15.4132   |
| 14          | 0.8131             | 1.2297   | 7.6716    | 47          | 0.9073             | 1.1021   | 15.6532   |
| 15          | 0.8159             | 1.2256   | 7.9116    | 48          | 0.9100             | 1.0988   | 15.8955   |
| 16          | 0.8188             | 1.2213   | 8.1183    | 49          | 0.9129             | 1.0954   | 16.1400   |
| 17          | 0.8217             | 1.2168   | 8.3972    | 50          | 0.9158             | 1.0919   | 16.3900   |

fuentes: (climasmonterrey.com, 2018). Obtenido de:  
<https://www.climasmonterrey.com/cuales-son-las-propiedades-del-aire>



Tabla 62. Densidad del agua entre 0° y 100°C

| Temperatura | Densidad | Temperatura | Densidad | Temperatura | Densidad |
|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|
| t           | $\rho$   | t           | $\rho$   | t           | $\rho$   |
| [°C]        | [Kg/m3]  | [°C]        | [Kg/m3]  | [°C]        | [Kg/m3]  |
| 0 (hielo)   | 917,00   | 33          | 994,76   | 67          | 979,34   |
| 0           | 999,82   | 34          | 994,43   | 68          | 978,78   |
| 1           | 999,89   | 35          | 994,08   | 69          | 978,21   |
| 2           | 999,94   | 36          | 993,73   | 70          | 977,63   |
| 3           | 999,98   | 37          | 993,37   | 71          | 977,05   |
| 4           | 1000,00  | 38          | 993,00   | 72          | 976,47   |
| 5           | 1000,00  | 39          | 992,63   | 73          | 975,88   |
| 6           | 999,99   | 40          | 992,25   | 74          | 975,28   |
| 7           | 999,96   | 41          | 991,86   | 75          | 974,68   |
| 8           | 999,91   | 42          | 991,46   | 76          | 974,08   |
| 9           | 999,85   | 43          | 991,05   | 77          | 973,46   |
| 10          | 999,77   | 44          | 990,64   | 78          | 972,85   |
| 11          | 999,68   | 45          | 990,22   | 79          | 972,23   |
| 12          | 999,58   | 46          | 989,80   | 80          | 971,60   |
| 13          | 999,46   | 47          | 989,36   | 81          | 970,97   |
| 14          | 999,33   | 48          | 988,92   | 82          | 970,33   |
| 15          | 999,19   | 49          | 988,47   | 83          | 969,69   |
| 16          | 999,03   | 50          | 988,02   | 84          | 969,04   |
| 17          | 998,86   | 51          | 987,56   | 85          | 968,39   |
| 18          | 998,68   | 52          | 987,09   | 86          | 967,73   |
| 19          | 998,49   | 53          | 986,62   | 87          | 967,07   |
| 20          | 998,29   | 54          | 986,14   | 88          | 966,41   |
| 21          | 998,08   | 55          | 985,65   | 89          | 965,74   |
| 22          | 997,86   | 56          | 985,16   | 90          | 965,06   |
| 23          | 997,62   | 57          | 984,66   | 91          | 964,38   |
| 24          | 997,38   | 58          | 984,16   | 92          | 963,70   |
| 25          | 997,13   | 59          | 983,64   | 93          | 963,01   |
| 26          | 996,86   | 60          | 983,13   | 94          | 962,31   |
| 27          | 996,59   | 61          | 982,60   | 95          | 961,62   |
| 28          | 996,31   | 62          | 982,07   | 96          | 960,91   |
| 29          | 996,02   | 63          | 981,54   | 97          | 960,20   |
| 30          | 995,71   | 64          | 981,00   | 98          | 959,49   |
| 31          | 995,41   | 65          | 980,45   | 99          | 958,78   |
| 32          | 995,09   | 66          | 979,90   | 100         | 958,05   |

Fuente: (Santibañez, 2018). Obtenido de: <https://es.scribd.com>  
<https://es.scribd.com/doc/94148509/Densidad-del-agua-entre-0-y-100-C>