

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO
CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
AVÍCOLAS.

SANDRA MILENA ARISTIZABAL GOMEZ
NATALIA RUEDA BOTIA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO
CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
AVÍCOLAS.

SANDRA MILENA ARISTIZABAL GOMEZ
NATALIA RUEDA BOTIA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Director
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA
Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2019

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION	18
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	22
3. OBJETIVOS.....	23
3.1. OBJETIVO GENERAL	23
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO	23
4. AGUAS RESIDUALES.....	24
4.1. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES	25
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	27
4.2.1. Características físicas.....	27
4.2.2. Características químicas.....	28
4.2.3. Características biológicas	29
4.3. NORMATIVIDAD VIGENTE PARA LAS AGUAS RESIDUALES.....	29
4.4. TIPOS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES	31
4.4.1. Procesos físicos.....	31
4.4.2. Procesos químicos.....	33
4.4.3. Procesos biológicos	36
4.5. GRADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	39
5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR EVAPORACIÓN	40
5.1. EVAPORACIÓN AL VACÍO.....	40
5.2. TIPOS DE EVAPORACIÓN AL VACÍO	41
5.2.1. Evaporación al vacío mediante bomba de calor	41
5.2.2. Evaporación al vacío de múltiple etapa	42
5.2.3. Evaporación por compresión mecánica del vapor:	43
6. BASES TEÓRICAS.....	45
6.1. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EBULLICIÓN.....	45

6.1.1. Ebullición en estanque.....	46
6.2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDENSACIÓN	48
6.2.1. Condensación en película descendiente.....	48
6.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN FLUJO BIFÁSICO.....	50
6.3.1. Evaporación por convección forzada en tubos	50
6.3.2. Condensación tipo película descendiente.....	51
6.4. BOMBA DE CALOR.....	53
7. PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA.....	55
7.1. REQUERIMIENTOS.....	55
7.2. DISEÑO CONCEPTUAL.....	56
7.3. ANÁLISIS DEL PROCESO DE DISEÑO	58
7.3.1. Balance de masa	58
7.3.2. Balance de energía.....	59
7.3.3. Diseño térmico de los intercambiadores de calor	60
7.4. DISEÑO EXTERNO	65
7.4.1. Condensador del sistema	65
7.4.2. Evaporador del sistema	66
7.5. SELECCIÓN DE COMPONENTES	67
7.5.1. Compresor	67
7.5.2. Válvula de expansión termostática	68
7.5.3. Condensador auxiliar del sistema	69
8. CONSTRUCCIÓN.....	70
8.1. ESTRUCTURA.	70
8.2. INTERCAMBIADORES DEL SISTEMA	71
8.3. MONTAJE DEL SISTEMA.....	75
9. PRUEBAS	76
9.1. PRUEBAS DE ENSAMBLAJE.....	76

9.1.1. Prueba de estanqueidad en el evaporador y condensador de agua de forma individual.....	76
9.1.2. Prueba de estanqueidad del sistema total para el lado de agua.....	77
9.1.3. Prueba de estanqueidad en el sistema de refrigeración	78
9.2. PRUEBAS OPERACIONALES	79
9.2.1. Pruebas preliminares	79
9.2.2. Prueba real.	94
9.2.3. Prueba de concentración de sólidos.	103
9.3. PRUEBAS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO	104
10. COSTOS.....	107
10.1. COSTO DE FABRICACIÓN.....	107
10.2. COSTO DE OPERACIÓN.....	108
10.3. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO.....	109
10.4. FACTOR DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR	109
11. CONCLUSIONES	111
12. RECOMENDACIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA.....	115
ANEXOS.....	119

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Vertimiento de Aguas residuales	20
Figura 2. Eutroficación de fuentes hídricas por contaminación con aguas residuales con elevada carga orgánica.....	21
Figura 3. Tratamiento químico mediante coagulantes y floculantes	22
Figura 4. Tratamientos realizados al agua residual.	39
Figura 5. Evaporación al vacío mediante bomba de calor.	42
Figura 6. Evaporación al vacío de múltiple etapa.	43
Figura 7. Evaporación por compresión mecánica del vapor.	44
Figura 8. Curva de ebullición para el agua a la presión de 1 atm.	46
Figura 9. Condensación en película por fuera de los tubos.	48
Figura 10. Patrones de flujo para un evaporador de tubo horizontal.	50
Figura 11. Condensación en película al interior de los tubos de cobre.....	51
Figura 12. Bomba de calor simplificada	53
Figura 13. Diagrama de un sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas.....	57
Figura 14. Balance de energía de la bomba de calor (refrigerante).....	59
Figura 15. Evaporador del agua con sus respectivos flujos y parámetros.	61
Figura 16. Condensador de agua con sus respectivos flujos y parámetros.	63
Figura 17. Diseño externo del condensador del sistema (agua).....	65
Figura 18. Diseño externo del evaporador del sistema (agua).	66
Figura 19. Estructura del sistema de evaporación.	70

Figura 20. Haz de tubos de cobre al interior del intercambiador.....	71
Figura 21. Herramienta empleada en la expansión mecánica del haz de tubos de cobre.....	71
Figura 22. Empaque de nitrilo atoxico.....	72
Figura 23. Bridas de cada intercambiador.	72
Figura 24. Tubería de vapor.	73
Figura 25. Indicador de nivel.....	73
Figura 26. Unión de carga y descarga del intercambiador grande.....	74
Figura 27. Conexión del intercambiador pequeño (horizontal) con el tanque de condensado.	74
Figura 28. Sistema de evaporación de aguas residuales.	75
Figura 29. Sistema de agua.....	77
Figura 30. Sistema de refrigerante.....	78
Figura 31. Efecto del nivel de agua en el evaporador en la producción.....	82
Figura 32. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.....	82
Figura 33. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.	83
Figura 34. Producción de vapor instantánea y caída del nivel acumulada en el tiempo.	83
Figura 35. Diagrama de flujos de calor.	85
Figura 36. Efecto de la presión de vacío en la producción.	86
Figura 37. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.....	87

Figura 38. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.	87
Figura 39. Producción de vapor instantánea y caída del nivel acumulada en el tiempo.	88
Figura 40. Efecto de la presión de condensación del refrigerante en la producción.	90
Figura 41. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.	90
Figura 42. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.	91
Figura 43. Producción de vapor instantánea y caída del nivel acumulada en el tiempo.	91
Figura 44. Diferencial de temperatura en el evaporador del sistema.	92
Figura 45. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.	95
Figura 46. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.	96
Figura 47. Producción de vapor acumulada en el tiempo.	96
Figura 48. Comparación.	97
Figura 49. Temperaturas en el evaporador y condensador del sistema.	99
Figura 50. Vacío en el evaporador y condensador del sistema	99
Figura 51. Presión en el sistema de refrigeración.	100
Figura 52. Producción de vapor cada 10 minutos.	100
Figura 53. Producción de vapor acumulada en el tiempo.	101
Figura 54. Nivel absoluto del agua residual en la prueba continua.	101
Figura 55. Comparación.	102

Figura 56. Concentración de sólidos.....	104
Figura 57. Antes y después del tratamiento.....	104
Figura 58. Puntos de medición de los factores que definen la potencia eléctrica.	108
Figura 59. Variación del COP y el FfBC.....	110
Figura 60. Variación del COP y las presiones de la bomba de calor.	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Contaminantes derivados de aguas domésticas e industriales y sus consecuencias ecológicas, estéticas y en la salud humana.	25
Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas de actividades de ganadería de aves de corral (beneficio).....	30
Tabla 3. Tratamientos físicos para el agua residual.....	31
Tabla 4. Tratamientos químicos para el agua residual.	33
Tabla 5. Procesos biológicos para el agua residual.....	37
Tabla 6. Parámetros iniciales del agua y del refrigerante.	55
Tabla 7. Parámetros iniciales del evaporador de agua (condensador de refrigerante).	61
Tabla 8. Parámetros iniciales del condensador de agua (evaporador de refrigerante).	63
Tabla 9. Parámetros para seleccionar el compresor.....	67
Tabla 10. Pruebas de estanqueidad en el sistema de agua.	76
Tabla 11. Prueba de estanqueidad en el sistema de agua ensamblado.....	77
Tabla 12. Pruebas en el sistema integral, lado refrigerante.....	78
Tabla 13. Coeficientes involucrados en el flujo de transferencia de calor.....	93
Tabla 14. Efecto de la variación de los parámetros que determinan el flujo de calor en el condensado final de cada prueba.	93

Tabla 15. Efecto de la variación de los parámetros que determinan el flujo de calor en el condensado final de cada prueba.	103
Tabla 16. Comparación de los resultados del análisis de laboratorio con la normativa para el vertimiento.	105
Tabla 17. Costos de fabricación del sistema de evaporación al vacío con bomba de calor.	107
Tabla 18. Costo de operación del equipo por periodos de tiempo.	108

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. NORMATIVA COLOMBIANA ACERCA DE LOS VERTIMIENTOS ...	120
ANEXO B. TABLAS DE CÁLCULOS TERMODINÁMICOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.	139
ANEXO C. CÓDIGO EN EES DEL DISEÑO TERMICO PARA EL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.	154
ANEXO D. CATÁLOGOS.	171
ANEXO E. PLANOS DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.	183
ANEXO F. TABLAS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.	198
ANEXO G. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL AGUA DE ENTRADA Y SALIDA DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.	209
ANEXO H. MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.	213

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS*.

AUTORES: SANDRA MILENA ARISTIZABAL GÓMEZ; NATALIA RUEDA BOTIA**.

PALABRAS CLAVES: AGUAS RESIDUALES, TRATAMIENTO, VACÍO, BOMBA DE CALOR, PROTOTIPO.

DESCRIPCIÓN:

En búsqueda de alternativas de solución al problema de vertimiento de las aguas residuales industriales con alta concentración de contaminantes, se diseñó y construyó un prototipo que consiste en la evaporación del agua residual extrayendo su energía de la bomba de calor. Buscando reducir los costos de energía se recurre a la evaporación al vacío, pues permite manejar bajas presiones de saturación y no requiere de la adición de químicos para la separación de los sólidos suspendidos. Se diseñó el sistema térmico, teniendo en cuenta criterios de diseño tales como la cantidad de agua que se desea tratar, las temperaturas de evaporación y condensación de la bomba de calor y la temperatura de saturación; logrando así el dimensionamiento básico de los componentes del sistema para proceder a la construcción y selección de algunos componentes. Seguido a esto, se realizaron pruebas para verificar la resistencia mecánica de algunos componentes del equipo, para ponerlo en operación e identificar las variables de mayor influencia en la producción. Se realizó un análisis físico químico de las muestras del agua a tratar y tratada, para determinar la calidad del agua una vez finalizado el proceso; para lo cual se tomó como referencia la resolución 063 del año 2015, donde se especifican algunos de los valores límites máximos permitidos de contaminantes para realizar el vertimiento de las aguas residuales de sus respectivas áreas industriales al alcantarillado y así analizar el funcionamiento del equipo para su fin. Se analiza también la viabilidad de llevar el proyecto a la industria mediante la relación beneficio/costo. Finalmente se realizan recomendaciones en busca de mejorar el desempeño del equipo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Director: Omar Armando Gelvez Arocha

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND CONSTRUCTION OF A VACUUM EVAPORATION SYSTEM WITH A HEAT PUMP FOR THE TREATMENT OF POULTRY WASTEWATER*.

AUTHOR: SANDRA MILENA ARISTIZABAL GÓMEZ; NATALIA RUEDA BOTIA**.

KEYWORDS: WASTEWATER, TREATMENT, VACUUM, HEAT PUMP, PROTOTYPE.

DESCRIPTION:

In search of alternative solutions to the problem of discharge of industrial wastewater with high concentration of pollutants, a prototype was designed and built, which consists of the evaporation of wastewater extracting its energy from the heat pump. Seeking to reduce energy costs, vacuum evaporation is used, since it allows to handle low saturation pressures and does not require the addition of chemicals for the separation of suspended solids. The thermal system was designed, taking into account the design criteria such as the amount of water to be treated, the evaporation and condensation temperatures of the heat pump and the saturation temperature; thus achieving the basic dimensioning of the components of the system to proceed with the construction and selection of some components. Following this, tests were carried out to verify the mechanical resistance of some components of the equipment, to put it into operation and identify the variables with the greatest influence on production. A physical and chemical analysis of the samples of the water to be treated and treated was carried out to determine the quality of the water once the process was finished; for which reference was made to Resolution 063 of 2015, which specifies some of the maximum permissible values of contaminants to carry out the discharge of wastewater from their respective industrial areas into the sewer system and thus analyze the operation of the equipment for its finish. The feasibility of taking the project to the industry through the benefit / cost ratio is also analyzed. Finally recommendations are made in order to improve the performance of the team.

* Work Degree.

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Director: Omar Armando Gelvez Arocha

INTRODUCCIÓN

El suministro de agua es primordial en una comunidad, pero al abastecerla también se debe pensar en la adecuada eliminación de las aguas ya utilizadas que se convierten en potenciales vehículos de muchas enfermedades. Las fuentes de agua han sido incapaces por sí mismas de absorber y neutralizar dicha carga contaminante; como resultado, pierden aquellas condiciones mínimas que les son exigidas para su adecuado aprovechamiento como fuentes de abastecimiento de agua, como vías de transporte o fuentes de energía.

Las industrias son responsables de la mayor parte de dicha contaminación del agua, por lo que están obligadas a cumplir con una serie de requisitos en la calidad final de esta para poder verterla a los cuerpos de agua superficiales o en el alcantarillado público. Por ello, nace la necesidad de buscar sistemas eficientes, no solo desde el punto de vista económico, sino también desde el punto de la calidad final de las aguas tratadas debido a que una alta calidad en estas permitiría la reutilización de las mismas en los procesos industriales.

Los tratamientos más comunes para esto son los biológicos, evaporación-concentración y físico-químico. La evaporación-concentración es un proceso continuo de producción de agua de alta calidad que separa la fase contaminante mediante la aplicación de calor. pero su desventaja es el gasto energético asociado a este; por eso se plantea la evaporación al vacío con una bomba de calor como fuente de energía, con el fin de ahorrar y obtener bajos costos por litro de agua tratado.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

De los recursos naturales el más importante para la supervivencia de todos los seres vivos es el agua, ya que un gran consumo de esta satisface todas las necesidades de desarrollo y sostenimiento de la población. El suministro de agua en cantidad y calidad adecuada es una prioridad no solo para la comunidad residencial, también para las empresas que la requieren en sus procesos, pero una vez logrado este objetivo, surge otro no menos importante que consiste en la adecuada eliminación de las aguas residuales que se convierten en potenciales vehículos de muchas enfermedades y trastornos del medio ambiente. Debido a esto la Corporación Autónoma de la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), se encarga de llevar registros de los afluentes hídricos para corroborar cuales se encuentran en buen estado y cuales están contaminados, determinó que menos del 50% de estos afluentes hídricos tienen buena calidad, por tanto, se estima que a mediano plazo el grado de contaminación de las fuentes de agua aumentará, lo cual ha hecho necesario establecer políticas ambientales estrictas y desarrollar tratamientos de aguas residuales más eficientes.

Debido al vertimiento de las aguas residuales no tratadas a las fuentes hídricas se genera un impacto ambiental sobre la flora y la fauna cercanas, como lo son el deterioro del suelo causado por el aumento de salinización y saturación del agua, malos olores, alteraciones en la cadena alimenticia del ecosistema, entre otras. Buscando minimizar estos efectos, el estado colombiano a través del Ministerio del Medio Ambiente, ha reglamentado por medio de los decretos 1594 de 1984 y la resolución 0631 del 2015, la normativa para el vertimiento de aguas residuales y los valores máximos de agentes contaminantes permitidos. A pesar de la normativa existente, el Ministerio manifiesta que la pequeña y mediana industria en Colombia no realiza un tratamiento adecuado del agua que interviene en sus procesos antes de verterla.

Figura 1. Vertimiento de Aguas residuales



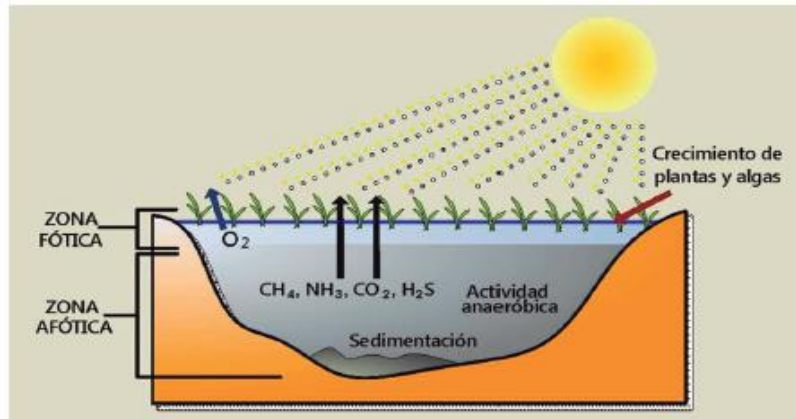
Fuente. VERAS, M. Las aguas residuales. [En línea] Alternativas para cuidar el medio ambiente. 2015. (Recuperado el 21 abril 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2T77TYe>

El proceso productivo en la industria avícola requiere abundantes suministros de agua en diversas unidades productivas que van desde la incubación, la crianza, hasta el beneficio; cada una de las cuales genera aguas residuales con altos niveles de contaminantes. Como consecuencia del uso ineficiente del agua en sus procesos o a que no se tiene un sistema de tratamiento adecuado, se llegan a afectar las fuentes hídricas naturales al realizar el vertimiento o se aumentan significativamente los niveles de contaminación de las aguas de alcantarilla al no cumplir a cabalidad la norma para su vertimiento.

Según Fenavi*, el primer efecto del vertimiento de aguas residuales es la pérdida de las cualidades organolépticas del medio receptor: color, olor, sabor, turbidez, lo que da una aceleración al proceso de eutrofización que consiste en el enriquecimiento del medio acuático con materia orgánica y nutrientes minerales, este enriquecimiento incrementa la actividad biológica, que se refleja en aumento de la biomasa y reducción del oxígeno disuelto. Las industrias buscan soluciones más amigables con el ambiente, las cuales contribuyen a presentar una menor contaminación hacia el alcantarillado y los cuerpos de agua cercanos a estas.

* . FENAVI Y MINAMBIENTE. Guía ambiental para el subsector avícola. Bogotá. 2014. Pag 8.

Figura 2. Eutrofización de fuentes hídricas por contaminación con aguas residuales con elevada carga orgánica.



Fuente. FEDERACION NACIONAL DE AVICULTORES DE COLOMBIA Y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía ambiental para el subsector avícola. Bogotá. 2014. Pag 8.

2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

En la industria avícola se busca reducir los contaminantes presentes en el vertimiento de sus aguas. Generalmente, en una PTAR avícola se utiliza el tratamiento químico, el cual consta de tres coagulantes para cumplir a cabalidad la remoción de sólidos suspendidos, generando estos insumos químicos un gasto extra al del consumo energético de los equipos empleados en el proceso, estimado promedio en 36 millones/mes para tratar un gasto promedio de 1700 m³/día de agua residual. Los tratamientos biológicos y químicos ampliamente utilizados en el tratamiento de aguas residuales industriales tienen desventajas, como grandes costos energéticos, costo extra de insumos químicos, producción de lodos y requieren grandes áreas para su instalación. Otra opción que se tiene son los tratamientos térmicos, como lo es la vaporización de las aguas que, aunque tienen un costo energético alto, en el caso de que se requiriera toda la energía para vaporizar el agua, este costo se puede disminuir utilizando calor residual proveniente de un proceso de producción o por medio de una bomba de calor, y así obtener una calidad de agua dentro de la normatividad establecida por el Ministerio del Medio Ambiente.

Este proyecto pretende contribuir a la solución de dicha problemática con el diseño y construcción de un sistema de evaporación al vacío para el tratamiento de aguas residuales avícolas, ya que los resultados obtenidos formaran parte del análisis y desarrollo del proyecto 2350 enmarcado y financiado por la Vicerrectoría de investigación y extensión (VIE).

Figura 3. Tratamiento químico mediante coagulantes y floculantes



Fuente. TECNOLOGIA, Acqua. Coagulantes y floculantes. [En línea]. Acqua tecnología, Ingeniería en tratamiento de agua y procesos. 2018. (Recuperado el 20 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2SSPnTZ>

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema de tratamiento de aguas residuales por evaporación al vacío con bomba de calor, contribuyendo con la misión de la escuela de ingeniería mecánica mediante el desarrollo de tecnología para la industria avícola local, buscando mitigar el efecto ambiental de sus vertimientos.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICO

- Diseñar y construir un prototipo para la depuración de aguas residuales efluentes de la industria avícola por medio de un sistema de evaporación al vacío con bomba de calor con las siguientes características:
 - Evaporador del depurador por condensación del refrigerante de la bomba de calor en película descendente.
 - Condensador del depurador por evaporación del refrigerante de la bomba de calor en tubos horizontales.
 - Capacidad de tratamiento del depurador de 1 lt/hora de aguas residuales.
- Implementar un sistema de adquisición de datos para obtener variables como presión, caudal y temperatura con las cuales se realizará una comparación del comportamiento real respecto al teórico.
- Determinar la calidad del agua tratada en el prototipo experimental producto del tratamiento térmico del sistema de evaporación al vacío por bomba de calor.
- Realizar pruebas para determinar: el porcentaje de recuperación de agua destilada, coeficiente de desempeño del sistema y la relación del costo de producción de un litro de agua respecto de la energía requerida (relación beneficio/costo del prototipo).

4. AGUAS RESIDUALES

Se definen como aguas residuales, aquellas aguas cuyos parámetros de caracterización originales han sido alterados al ser empleada en diversas actividades humanas y que debido a esto requieren de un tratamiento previo antes de realizarse su vertimiento a un cuerpo natural o al sistema de alcantarillado, y en algunos casos antes de ser reutilizadas.

La procedencia de las aguas residuales se clasifica en dos grandes grupos: aguas residuales domésticas, provenientes del sector residencial y comercial, tienen un vertimiento generalmente directo al sistema de alcantarillado; y las aguas residuales industriales, provenientes de procesos productivos como las actividades mineras, agrícolas, energéticas, agroindustrial, entre otras. El vertimiento de las aguas residuales industriales dependerá del grado de contaminación con la que cuenta una vez finalizada su función en un proceso, ya que, a diferencia de las aguas domésticas, cada sector industrial cuenta con un régimen de control de concentración de los agentes contaminantes presentes en el agua residual al momento de realizar su vertimiento a un cuerpo natural o al sistema de alcantarillado.

También suele considerarse otro grupo de clasificación conocido como aguas residuales municipales, estas son una mezcla de las aguas residuales domésticas que son vertidas al sistema de alcantarillado, las aguas residuales de drenaje pluvial y algunos vertimientos de aguas residuales industriales que cumplieron con su cantidad de concentración de agentes contaminantes presentes después de realizar un tratamiento para poder cumplir su vertimiento al sistema de alcantarillado.

4.1. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES

AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS (ARD): son las aguas provenientes de las viviendas, edificios comerciales e institucionales después de que se han empleado en diversas labores; suelen clasificarse en aguas grises y negras. Las aguas grises son las provenientes de labores de limpieza general, aseo personal, la cocina, entre otros; aportantes de DBO, sólidos suspendidos, fósforo y grasas. Las aguas negras son las provenientes de inodoros, es decir, aquellas que transportan excrementos humanos y orina, ricas en sólidos suspendidos, nitrógeno y coliformes fecales. Su vertimiento se realiza de forma directa al sistema de alcantarillado.

AGUAS BLANCAS: generalmente son las de procedencia atmosférica, es decir el agua de lluvia, nieve o hielo, el agua empleada para el riego de plantas en las calles, parque y diversos lugares públicos, su vertimiento se realiza de forma directa al sistema de alcantarillado. Suelen contener alto contenido de sales.

AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES son las aguas provenientes de los procesos productivos realizados en fábricas, suelen contener aceites, detergentes, ácidos, entre otros. Su composición es muy variable, pues depende de la actividad industrial de la cual proviene, y requieren un tratamiento previo a su vertimiento, ya que se deben tener presentes los valores de concentración mínimos de agentes contaminantes en el agua establecidos en la norma, los cuales varían según la industria y el tipo de vertimiento que se desea realizar.

Tabla 1. Contaminantes derivados de aguas domésticas e industriales y sus consecuencias ecológicas, estéticas y en la salud humana.

Contaminantes	Parámetro de caracterización	Tipo de efluentes	Consecuencias
Sólidos suspendidos	Sólidos suspendidos totales	Domésticos Industriales	-Problemas estéticos -Depósitos de barros -Absorción de contaminantes

			-Protección de patógenos
Sólidos flotantes	Aceites y grasas	Domésticos Industriales	-Problemas estéticos
Materia orgánica biodegradable	DBO	Domésticos Industriales	-Consumo de oxígeno -Mortandad de peces -Condiciones sépticas
Patógenos	Coliformes	Domésticos	-Enfermedades transmitidas por el agua
Nutrientes	Nitrógeno Fósforo	Domésticos Industriales	-Crecimiento excesivo de algas (eutrofización del cuerpo receptor) -Toxicidad para los peces (amonio) -Enfermedades en niños (nitratos) -Contaminación del agua subterránea
Compuestos no biodegradables	Pesticidas Detergentes Otros	Industriales Agrícolas	-Toxicidad -Espumas (detergentes) -Reducción de la transferencia de oxígeno (detergentes) -No biodegradabilidad -Malos olores
Metales pesados	Elementos específicos (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn.)	Industriales	-Toxicidad -Inhibición al tratamiento biológico de las aguas residuales -Problemas con la disposición de los barros en la agricultura -Contaminación del agua subterránea
Aguas salobres	Sales minerales disueltas, NaCl, sales de calcio, sulfatos, nitratos, fosfatos, etc.	Industriales Mezcla de agua dulce con agua de mar.	-Contaminación del agua subterránea -Tratamientos avanzados y costosos

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales se caracterizan mediante los parámetros físicos, químicos y biológicos. Se debe tener en cuenta que cada agua residual es única, por lo cual, las características que se evalúan en cada parámetro dependerán de la procedencia de dicha agua. Para realizar la caracterización de las aguas residuales se hace un muestreo apropiado que conserve las características de la muestra para el análisis de laboratorio. Se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas.

4.2.1. Características físicas. Las características físicas de las aguas residuales son el contenido total de sólidos, el olor, la temperatura, la densidad, el color y la turbiedad. Dónde:

- Los sólidos totales abarcan la materia en suspensión, la materia sedimentable, la materia coloidal y la materia disuelta, se define su contenido como la materia obtenida como residuo después de someter al agua a un proceso de evaporación.
- El olor es debido a la descomposición de la materia orgánica, a medida que avanza los sulfatos se reducen a sulfitos y producen olores desagradables.
- La temperatura es un parámetro importante dada su influencia en el desarrollo de la vida acuática, en las reacciones químicas y la velocidad de reacción.
- La densidad aporta a la formación de corrientes de densidad en fangos de sedimentación y otras instalaciones de tratamiento.
- El color es un indicativo de la edad de las aguas residuales; el agua residual reciente tiene un color grisáceo, a medida que las condiciones se vuelven anaeróbicas su color cambia a negro.
- La turbiedad dificulta el proceso de filtración de las aguas, por lo que disminuye los tiempos de filtración y aumenta los costos de operación.

4.2.2. Características químicas. Las características químicas de las aguas residuales se plantean según la materia orgánica, la medición del contenido orgánico, la materia inorgánica y los gases presentes en el agua residual.

- La materia orgánica incluye los sólidos que provienen de los reinos animal y vegetal, así como de las actividades humanas que se relacionan con la síntesis de compuestos orgánicos. Además, las principales sustancias orgánicas que se encuentran en las aguas residuales son las proteínas (las responsables de la presencia de nitrógeno en el agua residual), hidratos de carbono (contienen azúcares, almidones, celulosa y fibra de madera), grasas y aceites (su presencia provoca problemas en la red de alcantarillado como en la planta de tratamiento).

- La medición del contenido orgánico se puede realizar con diferentes ensayos de laboratorio, los cuales son:

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): es la medición del oxígeno disuelto que consumen los microorganismos en el proceso de oxidación bioquímica de la materia orgánica, cuyos resultados se usan para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requerirá para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente y controlar el cumplimiento de las limitaciones del vertido del agua residual.

Demanda química de oxígeno (DQO): se utiliza un agente químico fuertemente oxidante en medio de un ácido para saber cuánto de la materia orgánica puede oxidarse. Se emplea para saber si la materia orgánica presente en el agua contiene compuestos tóxicos para la vida biológica. En las aguas residuales, el valor del DQO es mayor al DBO debido a que un mayor número de compuestos se oxidan más por vía química que biológica.

- La materia inorgánica es importante para la determinación y control de la calidad del agua. Los constituyentes inorgánicos que se evalúan en el agua son: el pH, los cloruros, la alcalinidad, el nitrógeno, fósforo, azufre y metales pesados.

- Los gases que se encuentran frecuentemente en las aguas residuales son el nitrógeno, el oxígeno y el dióxido de carbono, los cuales hacen parte de la atmosfera por lo que se encuentran en todas las aguas en contacto con la misma. Además, el sulfuro de hidrogeno, el amoniaco y el metano, son gases que se derivan de la descomposición de la materia orgánica presente en las aguas residuales.

4.2.3. Características biológicas. Las características biológicas de las aguas residuales se aprecian según los principales grupos de microorganismos (bacterias, hongos protozoos, etc.), plantas (algas) y animales. Los cuales se pueden utilizar como indicadores de contaminación en el agua.

4.3. NORMATIVIDAD VIGENTE PARA LAS AGUAS RESIDUALES

La normatividad vigente colombiana para el vertimiento de residuos líquidos en los sistemas de alcantarillado se establece en el decreto 1594 de 1984, el cual habla sobre los usos del agua y residuos líquidos que serán vertidos al alcantarillado; fue expedido por los sectores de salud, agua potable y saneamiento básico, medio ambiente y más que todo el servicio de alcantarillado. Así mismo, se tiene la resolución 0631 del 17 de marzo del 2015, que reglamenta el artículo 28 del decreto 3930 de 2010, donde se especifican los parámetros y valores límites de concentración de contaminantes permitidos para realizar el vertimiento de las aguas residuales de sus respectivas áreas industriales al alcantarillado, dicha normativa se encuentra en el ANEXO A.

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible les exige a las industrias que realizan vertimiento a los sistemas de alcantarillado público y a aguas superficiales aplicar dicha resolución. Los criterios que se regularizan en dicha norma son:

- a) Rangos de temperatura admisible para el agua residual a verter.
- b) Parámetros microbiológicos.
- c) Límites permisibles de ingredientes activos plaguicidas.
- d) Límites permisibles de parámetros fisicoquímicos.

En el capítulo VI de la resolución 0631 del 2015 se establecen los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas a cuerpos de agua superficiales; y el artículo 9 plantea dichos parámetros para actividades productivas de la agroindustria y ganadería. A continuación, se muestran los parámetros para la industria avícola:

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domesticas de actividades de ganadería de aves de corral (beneficio).

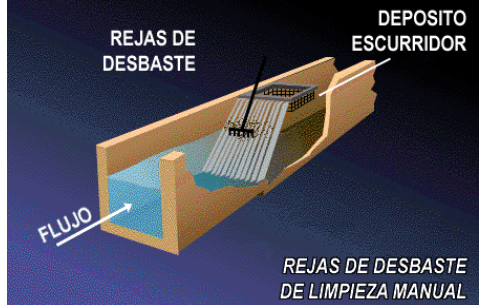
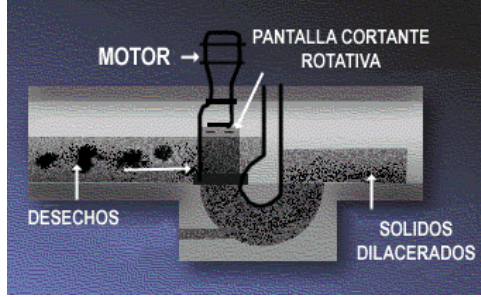
PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERIA DE AVES DE CORRAL (BENEFICIO)
Generales		
Ph	Unidades de Ph	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	650,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	300,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	2,00
Grasas y aceites	mg/L	40,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte
Compuesto de fósforo		
Ortofosfatos (P-PO₄³⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte
Compuesto de nitrógeno		
Nitratos (N-NO₃⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO₂⁻)	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)	mg/L	Análisis y reporte
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte
Iones		
Cloruros (Cl)	mg/L	250,00
Sulfatos (SO₄²⁻)	mg/L	250,00
Otros parámetros para análisis y reporte		

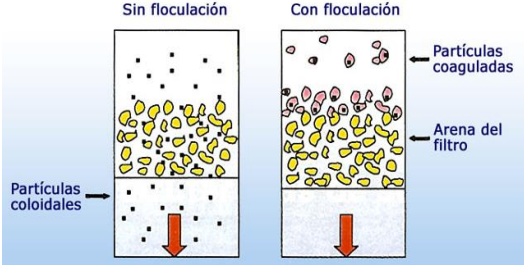

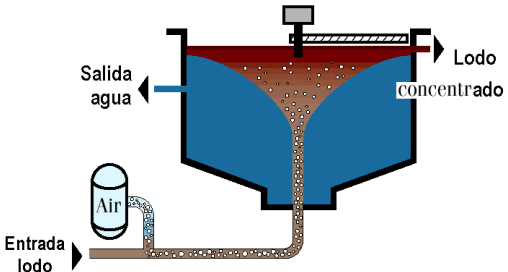
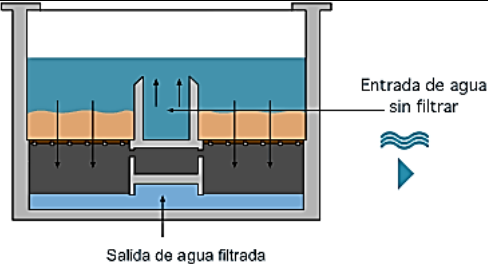
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte
Color real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y reporte

4.4. TIPOS DE TRATAMIENTOS DE AGUAS RESIDUALES

4.4.1. Procesos físicos. Son todos los procesos en los cuales se realiza la remoción de sólidos de grande y mediano tamaño que se encuentran flotando en el agua o suspendidos en esta. Para estos procesos se requieren fuerzas externas. Se encuentran presentes durante todo el proceso de tratamiento de aguas residuales. Los principales procesos físicos son los siguientes:

Tabla 3. Tratamientos físicos para el agua residual.

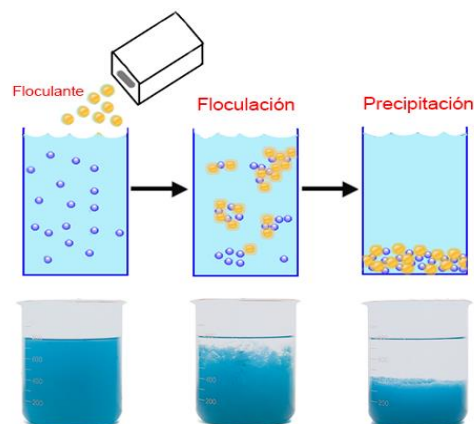
Proceso físico	Definición
Desbaste	<p>Retención de los sólidos gruesos del agua residual mediante una reja o un tamiz (puede ser manual), habitualmente de menor paso o luz de malla.</p>  <p>REJAS DE DESBASTE DEPOSITO ESCURRIDOR FLUJO REJAS DE DESBASTE DE LIMPIEZA MANUAL</p> <p>Fuente. Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua (Cidta). Capítulo: Desbaste.</p>
Dilaceración	<p>Triturar las materias sólidas arrastradas por el agua.</p>  <p>MOTOR → PANTALLA CORTANTE ROTATIVA DESECHOS → SÓLIDOS DILACERADOS</p> <p>Fuente. Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua (Cidta). Capítulo: Trituradores.</p>

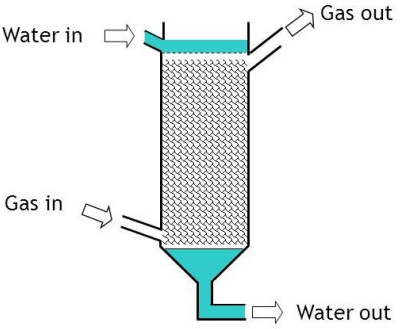
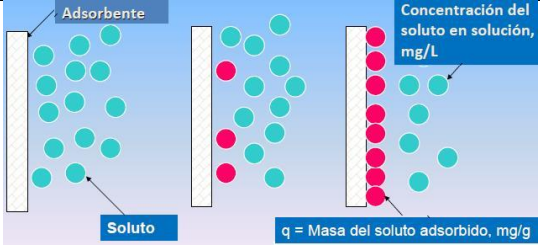
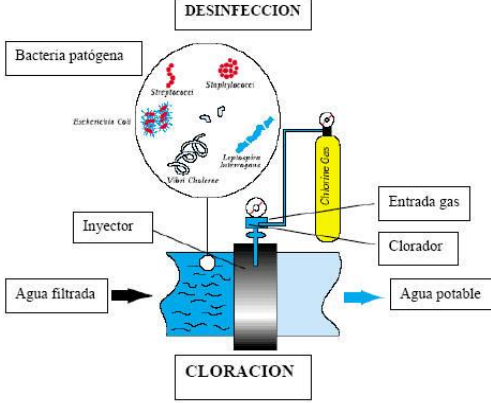
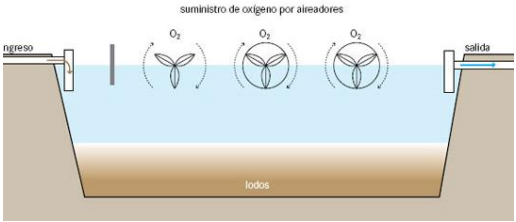
<p>Floculación</p>	<p>Unión entre los coágulos ya formados con el fin de aumentar su volumen y peso, para así poder decantarlos.</p>	 <p>Fuente. SPENA GROUP. Tratamiento primario del agua y aguas residuales – sistemas de coagulación y floculación.</p>
<p>Sedimentación</p>	<p>Consiste en la separación de las partículas suspendidas, por la acción de la gravedad, cuyo peso específico es mayor que el del agua.</p>	 <p>Fuente. Centro de investigación y desarrollo tecnológico del agua (Cidta). Conceptos: sedimentación.</p>
<p>Flotación</p>	<p>Se emplea para la eliminación de la materia suspendida y para la concentración de los lodos biológicos</p>	 <p>Fuente. El agua potable. Tratamiento de lodos.</p>
<p>Filtración</p>	<p>Separa un sólido suspendido del líquido al hacerlos pasar a través de un medio poroso por el cual el líquido puede penetrar fácilmente.</p>	 <p>Fuente. Purificación del agua.</p>

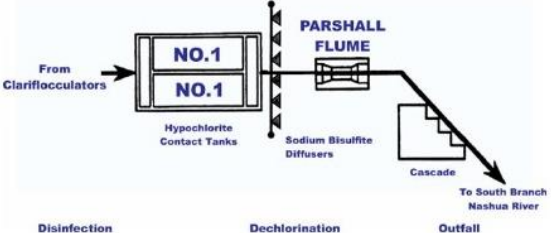
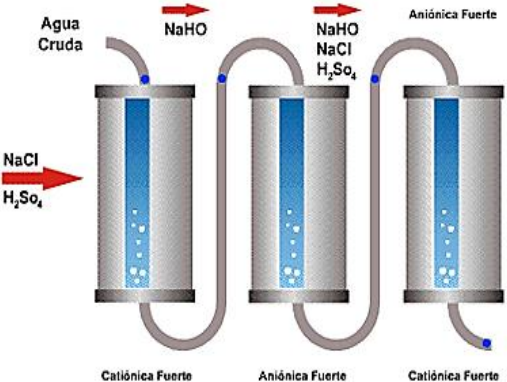
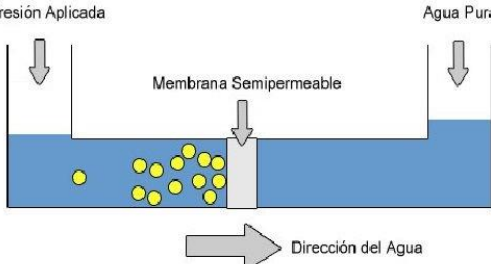
<p>Evaporación</p>	<p>Se realiza para eliminar impurezas que se encuentran disueltas en el agua al cambiar de un estado líquido a gaseoso cuando ha absorbido la energía necesaria. Se puede realizar a cualquier temperatura, es decir, puede ocurrir a presiones inferiores a la atmosférica.</p>	 <p>Fuente. Evaporacion. Evaporacion 11.</p>
--------------------	--	--


4.4.2. Procesos químicos. Son procesos generalmente empleados para la remoción de sólidos suspendidos y sólidos disueltos presentes en el agua mediante la adición de reactivos químicos, no se pueden emplear por sí solos, es necesario que sean acompañados de una operación física y biológica. Los principales procesos químicos son los siguientes:

Tabla 4. Tratamientos químicos para el agua residual.

Proceso químico	Definición	
<p>Precipitación química</p>	<p>Se utiliza para reducir la concentración de metales en el agua residual a niveles que no causen preocupación. Consiste en tres pasos que son la coagulación, floculación y sedimentación.</p>	 <p>Fuente. IQuimicas. Introducción al tratamiento de aguas residuales.</p>

<p>Transferencia de gases</p>	<p>Proceso mediante el cual un gas se disuelve en el agua residual para posteriormente ser extraído con una composición química diferente.</p>	 <p>Fuente. Depuración del agua ICQUBB. Transferencia de sólidos en el tratamiento del agua.</p>
<p>Adsorción</p>	<p>Propiedad de algunos materiales de fijar en su superficie moléculas orgánicas extraídas de la fase líquida en la que se encuentran.</p>	 <p>Fuente. Fisicoquímica. Temperatura adsorción.</p>
<p>Desinfección con cloro</p>	<p>La dosis de cloro debe ser suficiente para satisfacer la demanda de cloro y mantener un residual de cloro suficiente para inactivar o eliminar organismos patógenos.</p>	 <p>Fuente. El agua potable. Cloración.</p>
<p>Ozono para la eliminación de materia orgánica refractaria</p>	<p>Se utiliza ozono para oxidar químicamente el agua y reducir su toxicidad.</p>	 <p>Fuente. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. Estanque de aireación.</p>

<p>Decloración con dióxido de azufre</p>	<p>Eliminación de la totalidad del cloro combinado residual presente en el agua después de la cloración.</p>	 <p>Fuente. MWRA. The Clinton Wastewater Treatment Plant.</p>
<p>Intercambio iónico</p>	<p>El agua residual pasa por un recipiente con partículas aniónicas o catiónicas de resina. A medida que la solución pasa por el lecho de resina se realiza un intercambio en el que los iones inocuos (U o OH) de la resina, reemplazan a los iones de la misma carga que se desea eliminar (Cu^{2+} o CN^-), los cuales se encuentran disueltos en la solución.</p>	 <p>Fuente. Bosstech. Tratamiento de agua por intercambio iónico.</p>
<p>Ósmosis inversa</p>	<p>Es el flujo espontáneo de agua de una solución diluida a una solución más concentrada a través de una membrana semipermeable</p>	 <p>Fuente. Fibras y normas de Colombia. Ósmosis inversa.</p>

<p>Ultrafiltración</p>	<p>Proceso de remoción de partículas coloidales y dispersas de un líquido, haciéndolo pasar a través de una membrana aplicando alta presión.</p>	 <p>Fuente. H2O soluciones. Equipos de ultrafiltración.</p>
------------------------	--	---

4.4.3. Procesos biológicos. Se realizan cuando se desea remover los sólidos coloidales no sedimentables por medio de procesos físicos y químicos, ya que estas partículas procedentes de los sólidos suspendidos suelen tener un tamaño equivalente menor a 2 micrones de diámetro esférico, al agregar diversos microorganismos, generalmente bacterias, se obtiene la coagulación de dichos agentes contaminantes que previamente pasan a ser removidos mediante un proceso físico. Los objetivos al emplear el tratamiento biológico varían según el origen del agua residual a tratar y la disposición del agua una vez tratada. Los microorganismos más utilizados en estos tratamientos son:

- Bacterias: Es el componente principal y fundamental del flóculo. Básicamente son heterótrofas. Un flóculo "ideal" contiene una serie de bacterias filamentosas desarrollándose en equilibrio con el resto de las bacterias.
- Hongos: Los fangos activados no suelen favorecer el crecimiento de hongos, aunque algunos filamentosos sí pueden, ocasionalmente, ser observados en los flóculos de los fangos activos.
- Algas: Pueden aparecer en aquellas aguas residuales con gran cantidad de materia orgánica.
- Protozoos: Se encuentran en altas densidades y desempeñan un importante papel en el proceso de depuración y en la regulación del resto de la

comunidad biótica. Mejoran la calidad del efluente y regulan la biomasa bacteriana al predear sobre las bacterias dispersas del licor de mezcla.

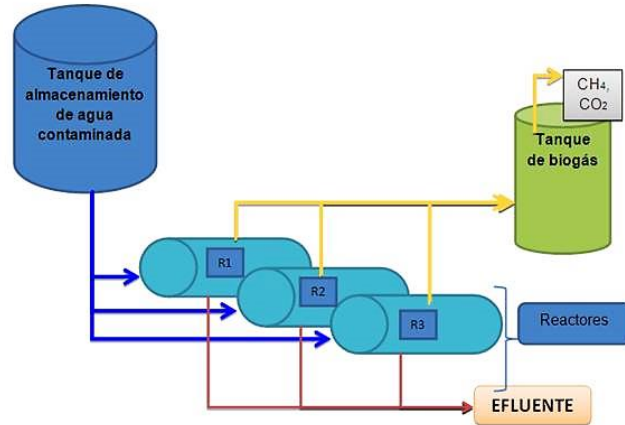
- Metazoos: Los organismos multicelulares más comunes son los Rotíferos. Eliminan bacterias libres y posibles patógenas (Salmonelas, bacterias fecales, etc.) y producen un mucus que mantienen el flóculo junto con el exopolisacárido producido por la bacteria Zooglea ramigera.

Los principales procesos biológicos utilizados según el tipo de microorganismo empleado se encuentran en la tabla 5.

Tabla 5. Procesos biológicos para el agua residual.

Proceso biológico	Definición
Aeróbico	<p>Es un proceso bacteriano que ocurre en presencia del oxígeno. Bajo condiciones aeróbicas, las bacterias consumen rápidamente la materia orgánica y la convierten en dióxido de carbono. Una vez que haya una carencia de la materia orgánica, las bacterias mueren y son utilizadas como alimento por otras bacterias. Esta etapa del proceso se conoce como respiración endógena. La reducción de los sólidos ocurre en esta fase.</p> <div data-bbox="639 1115 1382 1598" data-label="Diagram"> <p>El diagrama ilustra el proceso aeróbico. En la parte superior, un flujo de 'Oxígeno' (en un recuadro azul) y 'Materia Orgánica' (en un recuadro verde) se combinan y pasan a través de un símbolo de suma (+) hacia un recuadro que dice 'Bacterias'. Una flecha grande apunta a la derecha desde 'Bacterias' hacia un recuadro que contiene 'CO2 + H2O' (en azul) y 'Lodo biológico' (en naranja). Debajo de esto, se muestra un tanque de agua azul con burbujas de oxígeno que suben desde una serie de difusores verdes en el fondo. Una flecha indica el flujo de 'Agua residual' que entra por la parte inferior derecha y sale por la parte superior derecha como 'Efluente aeróbico'. Una etiqueta 'Oxígeno' apunta a las burbujas.</p> </div> <p>Fuente. ARANDA, Christian. Tratamiento biológico de aguas residuales.</p>
Anaeróbico	<p>Es un proceso bacteriano que se realiza en ausencia del oxígeno. El proceso puede ser la digestión termofílica en la cual el fango se fermenta en tanques en una temperatura de 55 °C, en una temperatura alrededor de 36 °C. Dicho proceso genera biogás con</p>

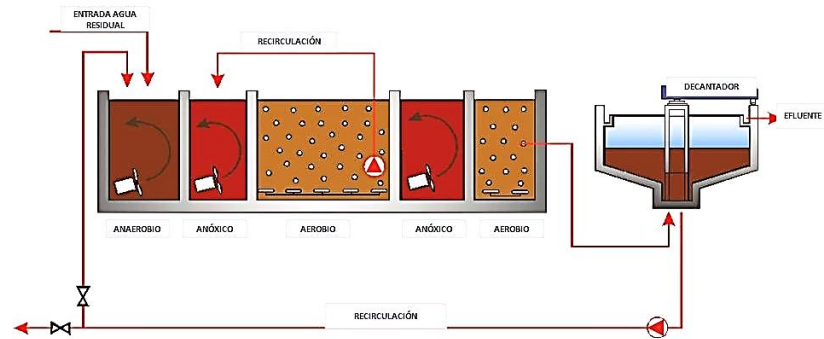
una parte elevada de metano que se puede utilizar para el tanque y los motores o las microturbinas del funcionamiento para otros procesos en sitio.



Fuente. DE LA CRUZ, Renzo. Monografías.

Es un proceso bacteriano que se realiza en ausencia del oxígeno. Como resultado, la conversión del nitrógeno, en forma de nitratos, a formas más rápidamente eliminables se puede llevar a cabo gracias a la acción de diversos géneros de bacterias. Así pues, este metabolismo permite la eliminación biológica del nitrógeno del agua residual.

Anóxico



Fuente. BARCAMP. Química medioambiental.

4.5. GRADOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

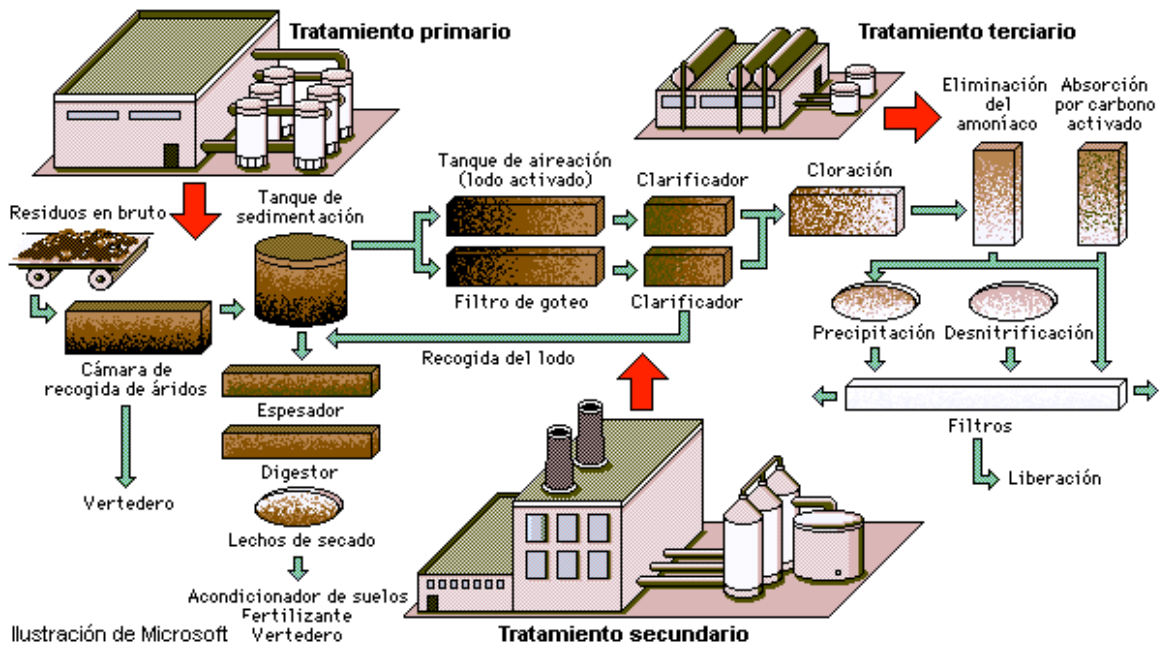
PRETRATAMIENTO: son tratamientos físicos en los que se busca eliminar sólidos gruesos, arenas, grasas y demás componentes que puedan provocar problemas de funcionamiento en el equipo y que conllevan al mantenimiento correctivo.

TRATAMIENTO PRIMARIO: son tratamientos físicos, operaciones unitarias, como la sedimentación y el desbaste

TRATAMIENTO SECUNDARIO: es el funcionamiento conjunto de algunos tratamientos físicos y químicos, una vez finalizado este tratamiento ya es posible realizar el vertimiento.

TRATAMIENTO TERCIARIO: es empleado más que todo cuando se desea eliminar nitrógeno y fósforo o cuando se desea reutilizar el agua en algún otro proceso.

Figura 4. Tratamientos realizados al agua residual.



Fuente. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Métodos o tipos de tratamiento de aguas residuales. [En línea]. 2014. (Recuperado el 10 septiembre 2018). Disponible en: <https://tratamientodeaguasresiduales.net/tipos/>

5. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR EVAPORACIÓN

La evaporación del agua residual permite separar eficientemente el agua pura de sus contaminantes, los cuales impiden que esta agua pueda ser reaprovechada o vertida al alcantarillado. La evaporación del agua requiere un aporte sustancial de calor (2250 KJ/Kg de agua a evaporar a presión atmosférica) por lo tanto, este método requiere que la fuente de energía para la vaporización sea económica. Existen diversas fuentes para obtener energía relativamente económica, por ejemplo: fuentes de energía de desecho a temperaturas medias, calor aportado en el condensador de una bomba de calor, la recuperación del calor mediante la utilización aparte del vapor generado condensándolo para evaporar una parte del agua residual que se encuentra a menor temperatura y, por lo tanto, menor presión.

5.1. EVAPORACIÓN AL VACÍO

Para facilitar la reducción de las impurezas en el agua residual se pueden emplear sistemas generadores de vacío, de modo que se someta el agua a presiones inferiores a la atmosférica, disminuyendo de esta manera la temperatura de ebullición de los líquidos y también aumentando la eficiencia del fenómeno de transferencia de calor en el sistema.

La separación mediante evaporación al vacío tiene la función de separar el agua entrante en dos partes: una parte del agua que tenga baja concentración de contaminantes en disolución y otra con un condensado líquido que tenga una elevada concentración de los mismos contaminantes. Para dicha separación se debe utilizar un foco caliente, el cual puede ser generado por gas, electricidad o biomasa, aunque es posible localizar en el proceso productivo excedentes de calor que puedan hacer muy económico el proceso; lo cual ha permitido a las empresas tener una solución económica viable debido a su versatilidad y ahorro energético.

Ventajas de los evaporadores al vacío:

- Alta calidad del destilado, ya que es posible recuperar hasta un 97% de agua limpia.
- Permite la reutilización de las aguas tratadas.
- Puede tratar los efluentes más complejos.
- Bajo consumo de electricidad.
- Diseño flexible y compacto de las máquinas.
- Fácil uso y poco mantenimiento.

El elemento que es diferente en el funcionamiento entre los tipos de evaporadores al vacío es la clase de evaporador que se utilice para calentar el agua residual a evaporar, el cual es el que determina los costos de operación.

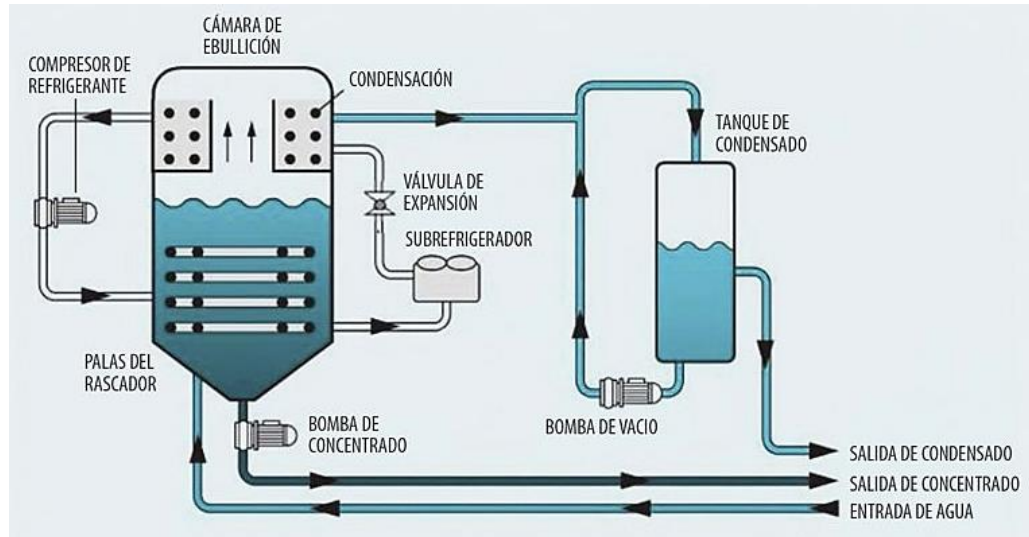
5.2. TIPOS DE EVAPORACIÓN AL VACÍO

Los diferentes tipos de evaporación al vacío que podemos encontrar son:

5.2.1. Evaporación al vacío mediante bomba de calor. El funcionamiento de este sistema se basa en el ciclo frigorífico de un gas refrigerante, el cual se encuentra en un circuito cerrado. El gas refrigerante se comprime mediante la acción de un compresor aumentando su presión y temperatura. Circula a través del intercambiador de calor del propio evaporador, calentando el agua residual.

Al trabajar al vacío, la temperatura de ebullición es del orden de 30 a 40°C. El líquido refrigerante abandona el intercambiador del evaporador y, mediante una válvula de expansión, se descomprime y enfría. Al pasar por un segundo intercambiador de calor, el condensador, hace que el vapor formado en el evaporador condense, a la vez que aumenta su temperatura justo antes de volver a pasar por el compresor y repetir así el ciclo.

Figura 5. Evaporación al vacío mediante bomba de calor.

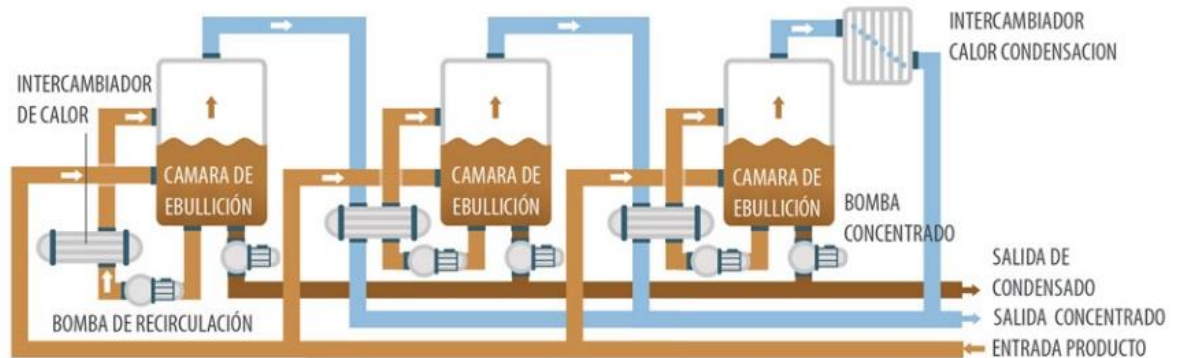


Fuente: CONDRICHEM ENVITECH. Evaporación al vacío mediante bomba de calor. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://condorchem.com/es/evaporadores-al-vacio-por-bomba-de-calor/>

El mismo fluido refrigerante permite evaporar el agua residual, así como condensar el vapor generado, por lo que el sistema no precisa de otras fuentes ni de calor ni de refrigeración. Este hecho hace que sea un proceso muy ventajoso desde el punto de vista económico y de gestión. Ofrecen a su vez, una importante reducción de la DQO en el destilado y una baja cantidad del concentrado de descarga.

5.2.2. Evaporación al vacío de múltiple etapa. Consiste en un conjunto de evaporadores conectados entre sí (en serie), en el que el vacío aumenta progresivamente del primero al último. Esto hace que la temperatura de ebullición, en principio, vaya disminuyendo, por lo que es posible utilizar el vapor generado en un evaporador (o etapa) como fluido calefactor de la siguiente etapa, produciéndose un efecto cascada. Finalmente, el destilado se condensa mediante una torre de refrigeración, con un consumo de agua poco significativo.

Figura 6. Evaporación al vacío de múltiple etapa.



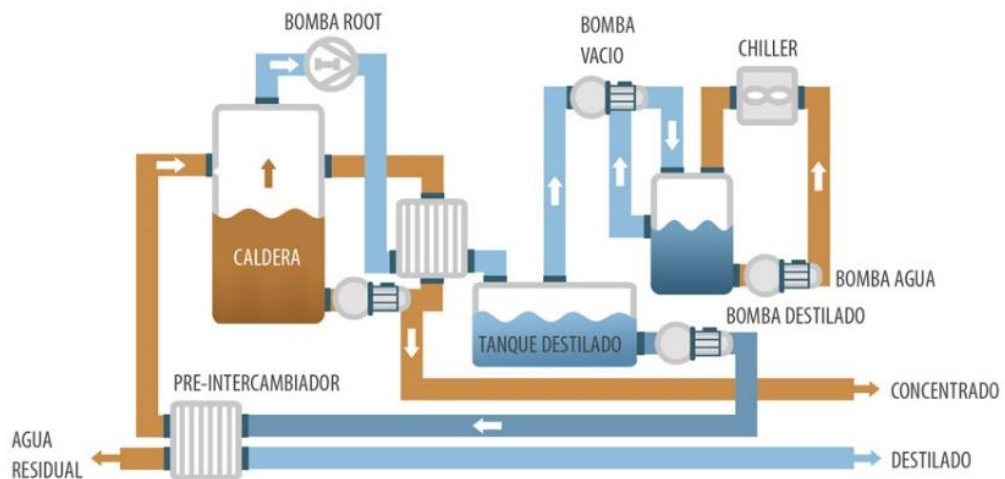
Fuente: CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

Usan como fuente de energía agua caliente o vapor procedente de un circuito externo, lo cual permite aprovechar flujos residuales sobrantes de calor. Casi siempre suelen ser unidades compuestas por 1 (simple), 2 (doble) o 3 (triple) etapas (evaporador).

Su principal ventaja respecto a un único evaporador reside en el ahorro tanto de fluido calefactor como de fluido refrigerante. Para tratar caudales elevados, ésta es una de las opciones más competitivas a nivel económico.

5.2.3. Evaporación por compresión mecánica del vapor. Se basa en la recuperación del calor de condensación del destilado como fuente de calor para evaporar el agua residual. Para conseguirlo, la temperatura del vapor generado en la evaporación se incrementa comprimiendo éste mecánicamente. Este vapor comprimido, y por tanto sobrecalentado, al pasar por el intercambiador del propio evaporador, consigue un doble objetivo: calentar el líquido a evaporar y condensar, economizando el uso de un fluido refrigerante.

Figura 7. Evaporación por compresión mecánica del vapor.



Fuente: CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

Dicho tipo de evaporador al vacío está diseñado para el tratamiento eficaz de efluentes residuales industriales de los procesos productivos y rechazos de plantas de tratamiento de aguas residuales con un bajo coste energético.

6. BASES TEÓRICAS

Los principios teóricos de los procesos de transferencia de calor requeridos para el diseño de los intercambiadores empleados en el sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas se nombran a continuación.

6.1. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EBULLICIÓN

Es un proceso de cambio de fase de líquido a vapor, el cual consiste en transferir calor por convección a determinado volumen de agua, en este caso, hasta lograr su vaporización. El proceso de ebullición tiene lugar en la interfase sólido – líquido, ya que el líquido que se desea vaporar entra en contacto con una superficie sólida que debe mantener una temperatura superficial mayor a la temperatura de saturación del líquido y así asegurar el flujo de calor en la ebullición.

Este proceso se caracteriza por la rápida formación de burbujas de vapor sobre la superficie sólida, que una vez formadas empiezan aumentar su tamaño hasta que finalmente se desprenden de la superficie sólida para elevarse hacia la superficie libre del líquido.

La expresión general para determinar el flujo de calor en la ebullición se expresa teniendo en cuenta la ley de Newton de enfriamiento, por medio de la ecuación (1).

$$\dot{q}_{ebullición} = h_{fluido} * \Delta T_{exc} \left[W/m^2 \right] \quad (1)$$

Donde el ΔT_{exceso} , es la diferencia entre la temperatura de la superficie sólida y la temperatura de saturación del fluido; Representa el exceso de temperatura que debe existir para realizar la transferencia de calor. En caso de obtener una magnitud negativa al determinar el ΔT_{exc} , se debe considerar el análisis que se realizó sobre la dirección del flujo de calor.

6.1.1. Ebullición en estanque. Ocurre cuando el fluido a vaporar está en reposo.

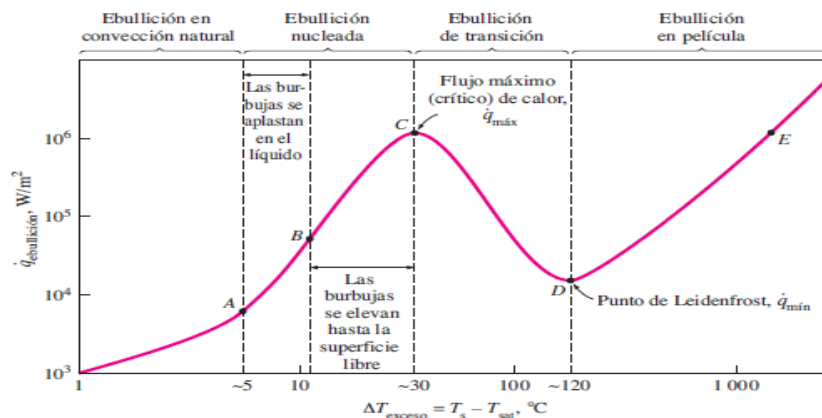
En la ebullición en estanque los movimientos que se presentan en el fluido pueden ser ocasionados por el movimiento de las burbujas bajo la influencia de la flotación y por corrientes de convección natural.

La ebullición en estanque se clasifica en ebullición sub enfriada y ebullición saturada, donde se puede decir que la primera corresponde al calor sensible que se requiere para llevar el fluido hasta la temperatura de saturación ya que inicialmente se encuentra a una temperatura menor a la del recipiente y por lo tanto menor a la de saturación; La segunda corresponde al calor latente puesto que el fluido ya se encuentra en la temperatura de saturación y se va realizar el proceso de cambio de fase.

6.1.1.1. Curva de ebullición en estanque

La figura 8 muestra la curva de ebullición para el agua a la presión de 1 atm, la cual es una gráfica del flujo de calor en la ebullición contra la temperatura de exceso, ya que según el ΔT_{exc} será el comportamiento de la ebullición, es decir el régimen en el que se encuentra. La forma específica de la curva depende del material de la superficie de calentamiento del fluido y de la presión del fluido y prácticamente independiente de la configuración geométrica de la superficie.

Figura 8. Curva de ebullición para el agua a la presión de 1 atm.



Fuente. Transferencia de calor y masa, 4ta ed. Cengel.

6.1.1.2. Ebullición nucleada

La ebullición nucleada consiste en que gracias a un flujo de calor sensible se empiezan a formar las primeras burbujas, las cuales al momento de flotar al encontrarse a una temperatura mayor a la del fluido ceden su energía condensándose en el fluido y así se va elevando la temperatura del fluido, esta etapa comprende del punto A al punto B, de la figura 8, seguido a este proceso la temperatura del fluido sigue incrementándose, hasta llegar a la temperatura de saturación, el punto C, donde el flujo de calor en ebullición es máximo.

En la práctica, suele presentarse la ebullición nucleada (entre los puntos A y C, en la figura 8) por ser el régimen más deseable porque en él se pueden lograr altos flujos de calor con ΔT_{exc} relativamente pequeños.

La correlación empleada en el proceso de transferencia de calor para ebullición en estanque nucleada es la propuesta en 1952 por Rohsenow y se expresa como:

$$\dot{q}_{ebullición} = \mu_{liq} * H_{fg} * \left[\frac{g * (\rho_{liq} - \rho_{vap})}{\sigma} \right]^{(0.5)} * \left[\frac{C_{p_{liq}} * (T_{Sup_{ext}} - T_{sat})}{C_{sf} * H_{fg} * Pr_{liq}^n} \right]^3 \quad (2)$$

Donde todas las propiedades deben ser determinadas a la temperatura de saturación.

$\dot{q}_{ebullición}$:	Flujo de calor en la ebullición nucleada, $[W/m^2]$
μ_{liq}	:	Viscosidad del líquido, $[Kg/m * s]$
H_{fg}	:	Entalpia de vaporización, $[J/Kg]$
g	:	Aceleración gravitacional, $[m/s^2]$
ρ_{liq}	:	Densidad del líquido, $[Kg/m^3]$
ρ_{vap}	:	Densidad del vapor, $[Kg/m^3]$
σ	:	Tensión superficial de la interfase liquido-vapor, $[N/m]$
$C_{p_{liq}}$:	Calor específico del líquido, $[J/Kg * °C]$
$T_{Sup_{ext}}$:	Temperatura superficial de la superficie caliente, $[°C]$

T_{sat}	:	Temperatura de saturación, [°C]
C_{sf}	:	Constante experimental de la combinación superficie-fluido.
Pr_{liq}	:	Numero de Prandtl del líquido.
n	:	Constante experimental que depende del fluido.

6.2. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDENSACIÓN

Se presenta cuando la temperatura de vapor se reduce por debajo de la temperatura de saturación del fluido, lo cual ocurre cuando el vapor entra en contacto con una superficie sólida que se encuentra a una temperatura superficial menor a la de saturación del vapor.

6.2.1. Condensación en película descendiente. En la condensación en película el líquido condensado moja la superficie solida al formar una capa de líquido que posteriormente resbala debido a la gravedad y deja libre la superficie para continuar con la transferencia de calor de forma eficiente, ya que el espesor de la película aumenta a medida que se realiza el condensado y a conforme cae este por efecto de la gravedad. Es así como suele ocurrir la condensación en la práctica.

Figura 9. Condensación en película por fuera de los tubos.



Fuente. Cengel, Transferencia de calor. Figura 10-28, 4ed.

La razón de transferencia de calor se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{conden} = h_{fluido} * A_s * (T_{sat} - T_{wo}) [W] \quad (3)$$

El calor latente de vaporización es liberado cuando una unidad de masa de vapor se condensa, en un proceso real el condensado suele enfriarse aún más, estando su valor entre la temperatura de saturación del vapor y la temperatura de la superficie sólida, liberando más calor. Para tener en cuenta el enfriamiento que sufre el líquido, se ha modificado el calor latente de vaporización para tener un cálculo más asertivo.

$$h_{fg,e} = h_{fg} + 0,68 * C_{p_l} * (T_{sat} - T_{wo}) \quad (4)$$

Teniendo en cuenta la modificación que se realiza al calor latente de vaporización para obtener un cálculo aún más acertado del flujo de calor, se puede determinar la razón de transferencia de la siguiente forma, también:

$$\dot{Q}_{conden} = \dot{m} * h_{fg,e} [W] \quad (5)$$

La correlación para determinar el coeficiente de transferencia de calor cuando la disposición es de un banco de tubos horizontales, siempre que el diámetro del tubo sea más grande en relación con el espesor de la película del líquido, es la siguiente:

$$h_{cond} = 0,729 * \left[\frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * K_l^3 * h_{fg,e}}{N_{tubos}^{fila} * \mu_l * D_{ext} * (T_{sat} - T_{wo})} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

Donde todas las propiedades del líquido se evalúan a la temperatura de película, la cual se define como la suma de la temperatura superficial y la temperatura de saturación sobre dos. El calor latente de vaporización y la densidad del vapor se evalúan a la temperatura de saturación.

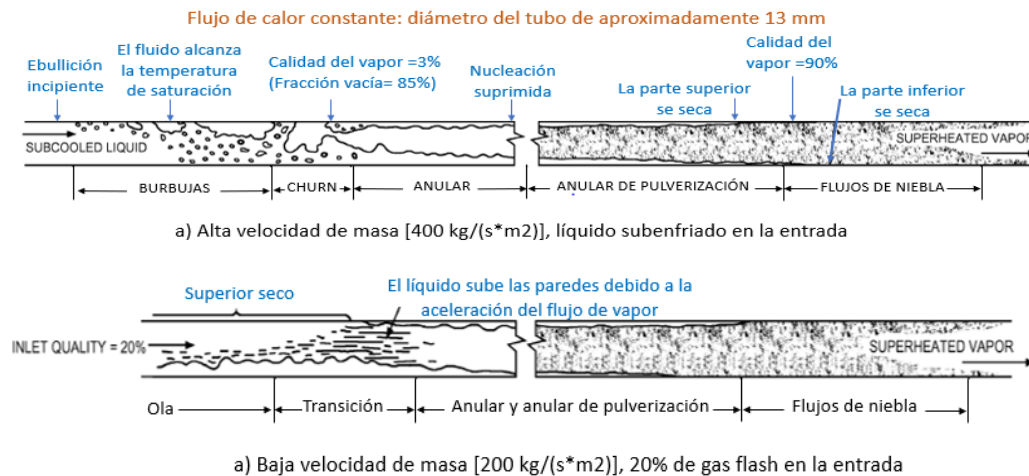
- h_{cond} : Coeficiente de transferencia de calor promedio para condensación en película sobre las superficies horizontales, $[W/m^2 * ^\circ C]$
- K_l : Conductividad del fluido
- N_{tubos}^{fila} : Numero de filas de tubos, según la distribución presente.
- D_{ext} : Diámetro exterior del tubo horizontal, [m].

6.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN FLUJO BIFÁSICO

Al momento de realizar un análisis térmico del refrigerante que fluye por los tubos de los intercambiadores, se debe tener presente que este se encuentra en cambio de fase a presión constante, es decir habrá tanto líquido como gas refrigerante. Por lo cual se deben emplear correlaciones experimentales para determinar el coeficiente de transferencia de calor de un fluido en bifásico.

6.3.1. Evaporación por convección forzada en tubos. Cuando una mezcla de líquido y vapor fluye por dentro de un tubo, el patrón de flujo que se desarrolla dependerá de la fracción de líquido, las propiedades del flujo de cada fase y la velocidad del flujo. En la figura 10 se ilustran los patrones de flujo que se pueden presentar en un evaporador de tubos horizontales. El patrón de comportamiento y desarrollo del fluido también se verá afectado por el diámetro de la tubería del evaporador por la cual fluye también, pues se debe tener presente el proceso de evaporación que ocurre internamente y como afectan los factores anteriores en la disminución del coeficiente de transferencia de calor local y la caída de presión.

Figura 10. Patrones de flujo para un evaporador de tubo horizontal.



Fuente. ASHRAE. Handbook - fundamentals. US. 2009. Cap 5. Pag 5.5.

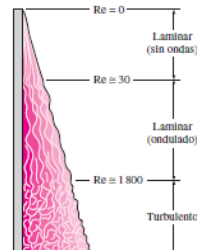
Debido a que las correlaciones que describen el comportamiento de transferencia de calor del fluido se han desarrollado experimentalmente, dependerán de las condiciones geométricas, flujo y refrigerante en el que ha sido probada la correlación, en este caso Kandlikar (1999) desarrollo un modelo para tubos horizontales y verticales, probado en R134a y para ebullición convectiva, la cual se determina mediante la siguiente correlación:

$$h_{refri_{ev}} = h_f * \left[1,136 * \left(\frac{\rho_{rl}}{\rho_{rv}} \right)^{0,45} * Xin^{0,72} * (1 - Xin)^{0,08} * f_2 * Fr_l + 667,2 * Bo^{0,7} * (1 - Xin)^{0,8} * F_{fl} \right] \quad (7)$$

El coeficiente de transferencia de calor donde todo el fluido se considera líquido (h_f), dependerá del patrón de flujo que se desarrolla, el diámetro, la rugosidad de la pared de la tubería de cobre y la relación entre la viscosidad y la difusividad térmica. El factor de asociación superficie líquido (F_{fl}), está determinado experimentalmente para ciertos fluidos en tubería de cobre comercial. En el caso de R-134a la relación está definida en 1.63. Este factor define el aumento de ebullición convectiva.

6.3.2. Condensación tipo película descendiente. En la mayoría de las aplicaciones de la condensación se retira el calor, es decir se libra energía, por medio de una interfaz sólida, por ejemplo, las paredes de un recipiente que contiene vapor saturado se empiezan a cubrir de líquido debido a que se genera un gradiente de temperatura dando como resultado una condensación sobre la superficie en gotas o en película, esto dependerá de las características físicas de la superficie sólida y del fluido.

Figura 11. Condensación en película al interior de los tubos de cobre.



Fuente. Cengel, Transferencia de calor. Figura 10-23, 4ed.

En la mayoría de los sistemas ocurre condensación tipo película puesto que la superficie de enfriamiento tiene una alta energía libre de superficie y entra en contacto con un fluido con menor energía superficial libre. A medida que el proceso ocurre el coeficiente de transferencia de calor se ve afectado por el espesor de la película condensada, la cual depende de la velocidad de condensación de vapor y eliminación de condensado. La velocidad de vapor también afecta el coeficiente de condensación.

En un condensador de película descendente, al ser el flujo de vapor hacia abajo, el espesor de la película disminuye y el coeficiente de transferencia de calor aumenta. Cuando el vapor sobrecalentado se condensa, el coeficiente de transferencia de calor depende de la temperatura de la superficie. Si la temperatura de la superficie está por debajo de la saturación, el valor de h para la condensación que incorpora la diferencia entre la saturación y las temperaturas superficiales sería una correlación con un error insignificante. Pero si la temperatura de la superficie está por encima de la saturación, no hay condensación y se deben emplear las correlaciones para la convección de gas.

La correlación empleada en este caso para determinar el coeficiente de transferencia de calor para la condensación es la propuesta por McAdams (1954), ya que se toma como condensación sobre una placa vertical larga y en flujo turbulento.

$$h_{refri_cond} = 0.0077 * Re_l^{0.4} * \left[\frac{K_{rl}^3 * \rho_{rl} * (\rho_{rl} - \rho_{rv}) * g}{\mu_{rl}^2} \right]^{1/3} \quad (8)$$

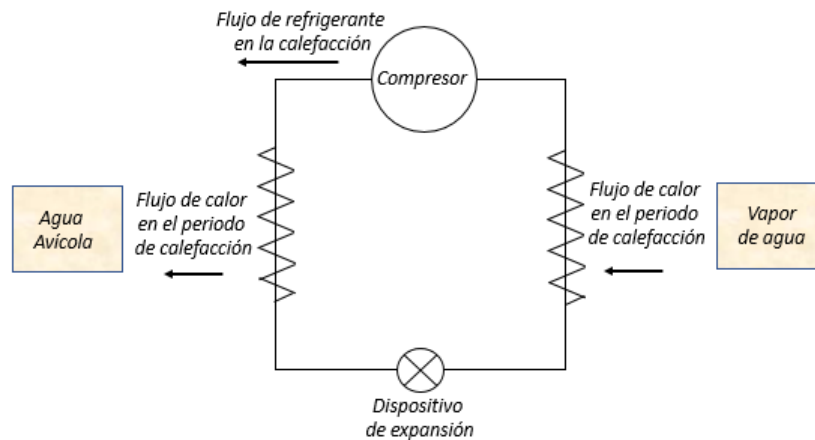
Para flujo turbulento: $Re_l > 1800$

6.4. BOMBA DE CALOR

Es un sistema de refrigeración en el que la utilización de calor residual que se extrae del condensador de refrigerante es el objetivo del ciclo. A diferencia del ciclo de refrigeración convencional, en el cual el propósito es absorber energía de un foco frío, aquí se proporciona calor a un foco caliente.

Los principales usos de la bomba de calor son la calefacción y refrigeración de residencias o edificios, pero también es de utilidad en procesos industriales donde el calor residual puede transportarse por la planta y emplearse para la calefacción o un proceso determinado que requiera calor. En este caso será empleado el calor extraído en la condensación como fuente de energía para la evaporación al vacío de agua residual avícola.

Figura 12. Bomba de calor simplificada



Al emplear agua como foco caliente en el funcionamiento de la bomba de calor se obtienen mejores características de funcionamiento que en el aire. Se emplea cuando se cuenta con grandes cantidades de masas de aguas próximas.

En una bomba de calor el refrigerante caliente proviene de la descarga del compresor, debe pasar por el agua avícola (foco caliente) donde se condensa al liberar calor de calefacción, después se expande en un dispositivo de expansión y a continuación pasa a recibir el calor del vapor de agua (foco frío) y terminando en la succión del compresor a baja temperatura y presión. El factor de mayor influencia sobre el funcionamiento de una bomba de calor es la temperatura del foco caliente.

El funcionamiento de una bomba de calor se expresa por el llamado “*factor de funcionamiento*”. El cual se define teóricamente como la relación entre la energía cedida en el condensador de refrigerante a la energía suministrada como potencia al compresor

$$\text{factor de funcionamiento} = \frac{\text{calor cedido en el ciclo}}{\text{trabajo necesario}} \quad (9)$$

$$\text{factor de funcionamiento} = \frac{Q_{\text{cond}}}{W} = \frac{Q_{\text{evap}} + W}{W} = \frac{Q_{\text{evap}}}{W} + 1 \quad (10)$$

$$\text{factor de funcionamiento} = COP + 1 \quad (11)$$

El factor de funcionamiento puede, por tanto, variar de 1 a ∞ .

El factor de funcionamiento de una bomba de calor práctica difiere del factor de funcionamiento teórico ya que una cierta potencia eléctrica se disipa como pérdida en el motor del compresor y otra cierta potencia eléctrica debe suministrarse al motor del ventilador del aire exterior. Es por esto que también se define la relación del factor de funcionamiento como la capacidad de calefacción a la energía eléctrica consumida.

7. PROCESO DE DISEÑO DEL SISTEMA

En este capítulo se presenta el paso a paso del proceso de diseño del sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas. Dicho diseño presenta los requerimientos del sistema, el diseño conceptual y el análisis del diseño.

7.1. REQUERIMIENTOS

- El sistema de evaporación al vacío funciona mediante una bomba de calor.
- El evaporador del sistema debe ser un intercambiador de calor de casco y tubos verticales.
- El condensador del sistema debe ser un intercambiador de calor de casco y tubos horizontales.
- La capacidad de tratamiento del depurador debe ser de 1 lt/hora de aguas residuales avícolas.

Tabla 6. Parámetros iniciales del agua y del refrigerante.

<i>Parámetros iniciales del agua</i>	
$P_{atm; bga} = 90660 [Pa]$	Presión barométrica en Bucaramanga, Santander, Colombia.
$T_{Sat} = T_7 = 49 [^{\circ}C]$	Temperatura establecida de saturación del agua.
$P_{vacio} = 78915 [Pa]$	Nivel de vacío mínimo requerido a partir de la presión atmosférica en Bucaramanga para lograr una temperatura de saturación del agua de 49°C.
$m_w = 1 \left[\frac{Kg}{h} \right]$	Flujo másico para la depuración de 1 [L/h] de agua.
$T_6 = 23 [^{\circ}C]$	Temperatura de entrada del agua al evaporador del sistema.
$T_8 = 23 [^{\circ}C]$	Temperatura de salida del agua del condensador del sistema.
<i>Parámetros iniciales del refrigerante</i>	
$T_c = 52,77 [^{\circ}C]$	Temperatura de condensación del refrigerante 134a.
$T_{ev} = -10,98 [^{\circ}C]$	Temperatura de evaporación del refrigerante 134a.

7.2. DISEÑO CONCEPTUAL

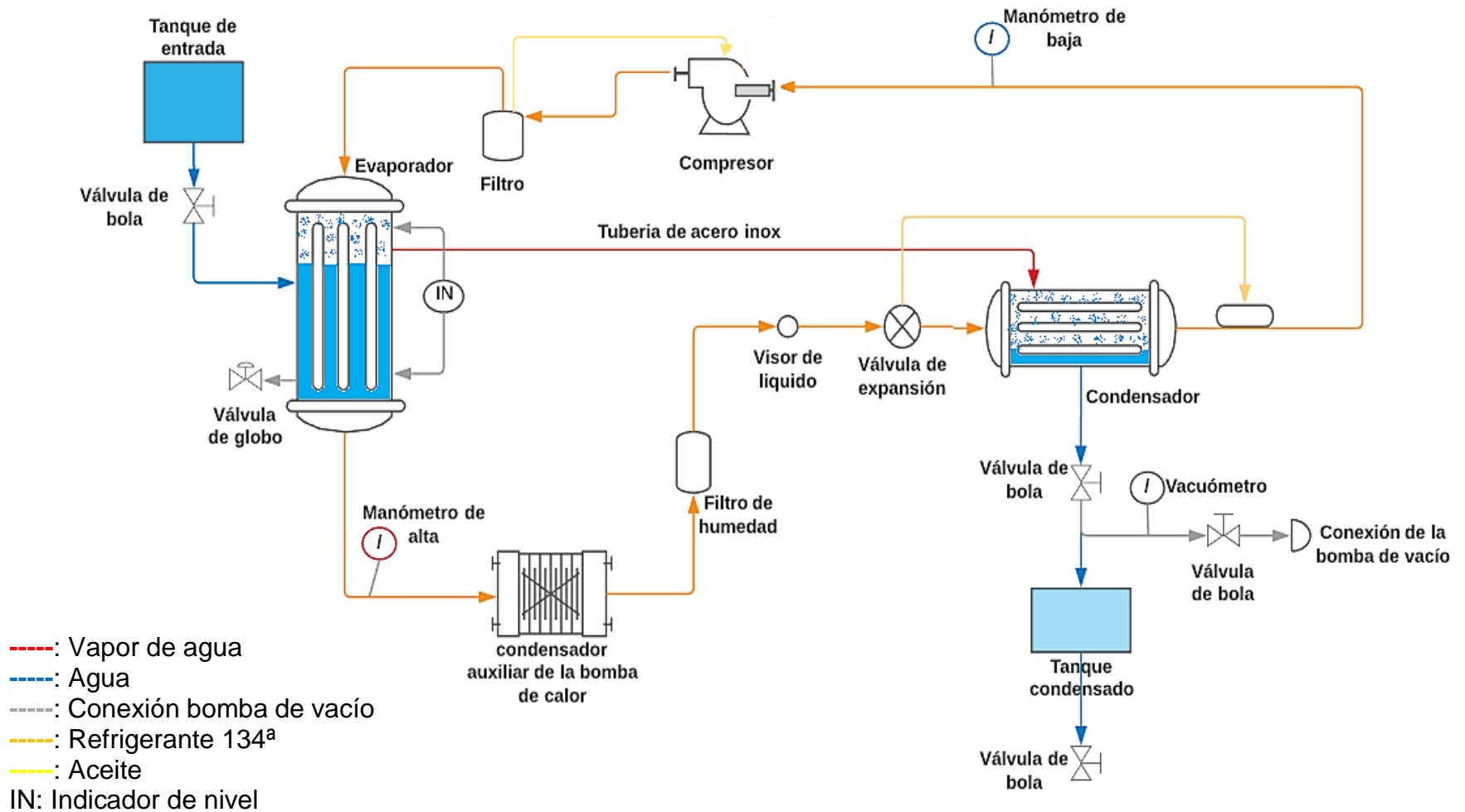
El sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas consta principalmente de dos partes: un sistema de depuración del agua y un sistema de bomba de calor.

El sistema de depuración del agua está conformado por: un evaporador, un condensador, tanque de entrada, tanque de condensado y una tubería de acero inoxidable que une a los dos intercambiadores. El evaporador de agua es un intercambiador de casco y tubos verticales, el cual es de película descendente. Por el casco se realiza la ebullición del agua residual mediante el calor desechado de la condensación del gas refrigerante que se realiza al interior de los tubos. El condensador de agua es un intercambiador de casco y tubos horizontales; aprovechando el calor extraído de la evaporación del líquido refrigerante que se realiza al interior de los tubos se produce la condensación del vapor de agua en película por fuera de los tubos.

El sistema de bomba de calor está conformado por: un compresor recíprocante, un evaporador de refrigerante, un condensador de refrigerante, válvula de expansión termostática y un condensador auxiliar. Dicho condensador auxiliar se coloca para ayudar a retirar el exceso de calor del gas refrigerante que viene del compresor asegurando de esta manera que a la válvula de expansión termostática el refrigerante llegue totalmente líquido. El refrigerante a utilizar es el 134^a.

El diagrama de tubería e instrumentación del sistema se puede observar en la siguiente figura:

Figura 13. Diagrama de un sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas.



7.3. ANÁLISIS DEL PROCESO DE DISEÑO

7.3.1. Balance de masa. Se hace un balance de masa debido a que el agua que ingresa al sistema es agua residual avícola y al realizar la transferencia de calor se originará un concentrado. Por lo que se presentan a continuación las consideraciones iniciales:

- Capacidad de tratamiento del depurador: $1 [l/h]$ de agua residual avícola.

Trabajando con la densidad del agua se obtiene una masa inicial de agua residual correspondiente a la capacidad de tratamiento:

$$\begin{aligned}\rho &= 1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \\ \dot{V} &= 5 \left[\frac{Lts}{h} \right] * \frac{1 m^3}{1000 Lts} = 0.005 \left[\frac{m^3}{h} \right] \\ \dot{m}_{inicial} &= \rho * \dot{V} = 5,5 \left[\frac{Kg}{h} \right]\end{aligned}\quad (12)$$

El agua residual se trabaja como una solución de agua y solidos suspendidos totales.

- Para hacer un balance por componentes, se debe conocer la densidad y concentración de los sólidos disueltos totales, los cuales se conocen mediante la caracterización del agua residual.

Balance de solidos:

$$\begin{aligned}C_{solidos} &= 898,6 \left[\frac{mg}{L} \right] = 0,0008986 \left[\frac{Kg}{L} \right] \\ \dot{V} &= 5,5 \left[\frac{Lts}{h} \right] \\ \dot{m}_{inicial}^{solidos} &= C_{solidos} * \dot{V} = 0,0049423 \left[\frac{Kg}{h} \right]\end{aligned}\quad (13)$$

$$\dot{m}_{inicial}^{solidos} = \dot{m}_{final} * X_{solidos}^{final}\quad (14)$$

$$X_{solidos}^{final} = n * X_{solidos}^{inicial}\quad (15)$$

Donde:

$X_{solidos}^{inicial}$: Es la concentración inicial que va a tener el agua que ingresa al evaporador y se obtiene de la caracterización que se realiza al agua antes de iniciar el proceso.

$X_{solidos}^{final}$: Es la concentración final que va a tener el agua del concentrado, la cual se vacía al tanque de residuos.

\dot{m}_{final} : Flujo másico del agua concentrada con mayor concentración de sólidos disueltos.

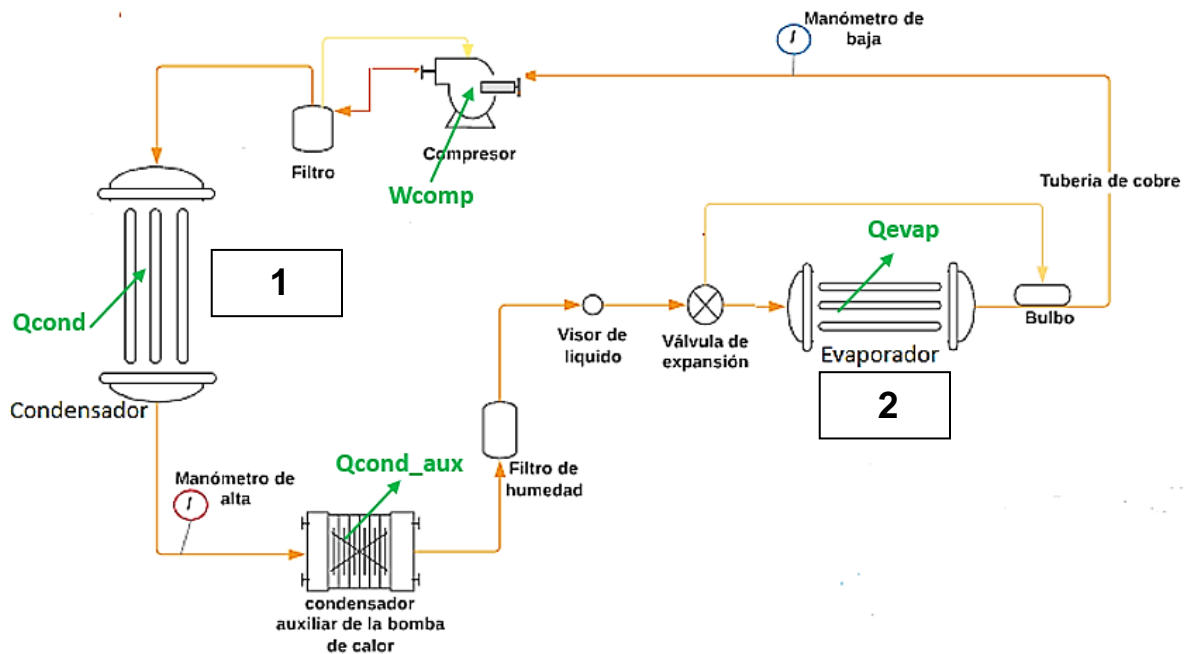
- De la ecuación del balance de sólidos conocemos la cantidad de agua que se queda en el evaporador con determinada concentración de sólidos, es así como del balance general conocemos la masa de vapor que se evapora. Balance general:

$$\dot{m}_{inicial} = \dot{m}_{final} + \dot{m}_{vapor} \quad (16)$$

- Se decidió que el vapor de agua para condensar es de $2 \left[\frac{l}{h} \right]$, lo que nos deja un caudal final del agua concentrada de $3,5 \left[\frac{l}{h} \right]$.

7.3.2. Balance de energía. Se hace el balance general de la bomba de calor y los balances de energía de los intercambiadores para que haya un equilibrio energético sin ninguna pérdida de calor.

Figura 14. Balance de energía de la bomba de calor (refrigerante).



Balance de energía de la bomba de calor:

$$E_{entrada} = E_{salida}$$
$$Q_{cond\ R134a} + W_{compresor} = Q_{evap\ R134a} + Q_{cond_aux} \quad (17)$$

Balance de energía en el evaporador de refrigerante y condensador del sistema, intercambiador 2:

$$Q_{evap\ R134a} = Q_{c_agua;lat} \quad (18)$$
$$Q_{evap\ R134a} = 1325 [W]$$

Balance de energía en el condensador de refrigerante y evaporador del sistema, intercambiador 1:

$$Q_{cond\ R134a} = Q_{ev_agua;sen} + Q_{ev_agua;lat} \quad (19)$$
$$Q_{cond\ R134a} = 1491 [W]$$

Donde: $Q_{cond\ R134a}$, $W_{compresor}$, $Q_{evap\ R134a}$ y Q_{cond_aux} , se especifican en la tabla 1 de cálculos termodinámicos en la que se muestra el procedimiento de cálculo paso a paso para conocer el valor de los calores del sistema y el flujo másico del refrigerante que se encuentra en el ANEXO B. Esto se realizó utilizando la ayuda del software EES, para observar detalladamente remítase al código en el ANEXO C.

7.3.3. Diseño térmico de los intercambiadores de calor. Se plantea el diseño térmico para los intercambiadores de calor a partir de sus respectivas bases teóricas de transferencia de calor, tomando en consideración los parámetros iniciales propuestos.

7.3.3.1. Evaporador del sistema

En el evaporador del sistema, se tiene un intercambiador de calor de carcasa y tubos verticales, el cual evapora agua y a su vez condensa el fluido refrigerante (R134a), debido al calor cedido por el refrigerante como observamos en la figura 15.

Figura 15. Evaporador del agua con sus respectivos flujos y parámetros.

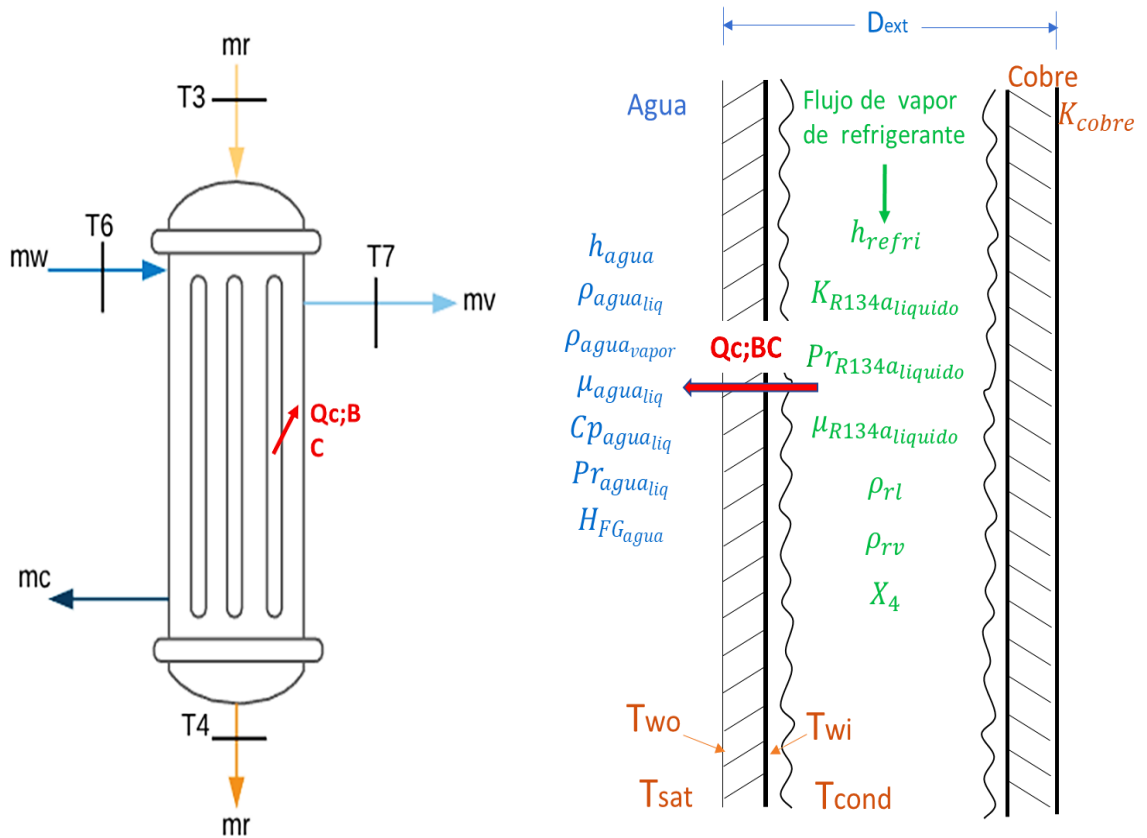


Tabla 7. Parámetros iniciales del evaporador de agua (condensador de refrigerante).

Parámetros iniciales	
$Q_{cond R134a} = 1491 [W]$	Calor obtenido del balance de energía en el condensador de refrigerante que corresponde al calor necesario para evaporar el agua.
$T_{Sat} = 49 [^{\circ}C]$	Temperatura supuesta de saturación del agua.
$T_c = 52,77 [^{\circ}C]$	Temperatura de condensación del refrigerante.
$D_{int} = 0.01092 [m]$	Diámetro interior del tubo de cobre (ANEXO D).
$D_{ext} = 0.0127 [m]$	Diámetro exterior del tubo de cobre (ANEXO D).
$N_{tubos} = 41$	Número de tubos dentro del evaporador del sistema.
$K_{cobre} = 330 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$	Conductividad del cobre.

Para el cálculo del evaporador, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Q_{cond R134a} = U_{int_c} * A_{int_c} * (T_C - T_{Sat}) = 1491 [W] \quad (20)$$

$$U_{int_c} * A_{int_c} = \frac{1}{R_{refri} + R_{pared} + R_{agua}} = 510,9 * 0,774 = 395.4366 \left[\frac{W}{^\circ C} \right] \quad (21)$$

$$A_{int_c} = \pi * D_{int_c} * L_c * N_{t_c} = \pi * 0,01092 * 0,5502 * 41 = 0,774 [m^2] \quad (22)$$

$$A_{ext_c} = \pi * D_{ext_c} * L_c * N_{t_c} = \pi * 0,0127 * 0,5502 * 41 = 0,9 [m^2] \quad (23)$$

$$R_{refri} = \frac{1}{h_{refri} * A_{int_c}} = \frac{1}{11696 * 0,774} = 0,0007619 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \quad (24)$$

$$R_{pared} = \frac{\ln \left[\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right]}{2 * \pi * K_{cobre} * L_{cond} * N_{tubos}} = 0,000003547 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \quad (25)$$

$$R_{agua} = \frac{1}{h_{agua} * A_{ext_c}} = \frac{1}{630,1 * 0,9} = 0,001763 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \quad (26)$$

De las correlaciones empleadas en los cálculos de transferencia de calor en el evaporador del sistema (agua) indicadas en la tabla 2 en el ANEXO B, se obtiene la longitud efectiva de los tubos en el evaporador del sistema.

$$L_{cond} = 0.5502 [m]$$

Dicho dimensionamiento del evaporador del sistema se hizo utilizando la ayuda del software EES, para observar detalladamente el código remítase al ANEXO C.

7.3.3.2. Condensador del sistema

En el condensador del sistema, se tiene un intercambiador de calor de carcasa y tubos horizontal, el cual condensa agua y a su vez evapora el fluido refrigerante (R134a), debido al calor absorbido por el refrigerante como observamos en la figura 16.

^{*} Para ver la correlación utilizada para este valor remitirse a la tabla 2 del anexo B.

^{**} Para ver la correlación utilizada para este valor remitirse a la tabla 2 del anexo B.

Figura 16. Condensador de agua con sus respectivos flujos y parámetros.

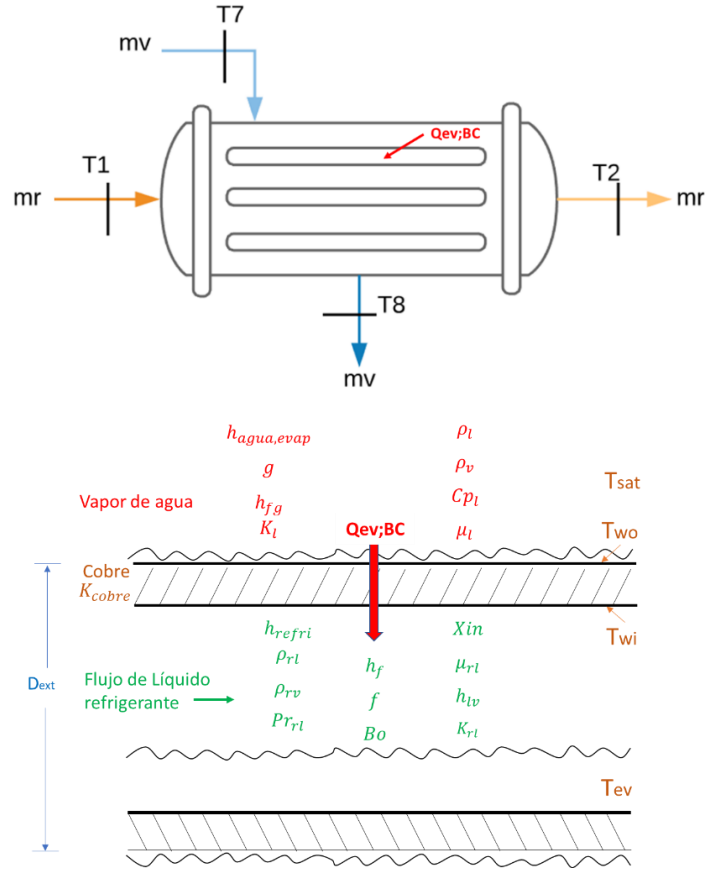


Tabla 8. Parámetros iniciales del condensador de agua (evaporador de refrigerante).

Parámetros iniciales	
$Q_{evap\ R134a} = 1325 [W]$	Calor obtenido del balance de energía en el evaporador de refrigerante que corresponde al calor necesario para condensar el vapor de agua.
$T_{Sat} = 49 [^{\circ}C]$	Temperatura establecida de saturación del agua.
$T_{ev} = -10,98 [^{\circ}C]$	Temperatura de evaporación del refrigerante.
$\dot{m}_{vapor} = 2 [l/h]$	Flujo másico del vapor de agua.
$D_{int} = 0,01092 [m]$	Diámetro interior del tubo de cobre (ANEXO D).
$D_{ext} = 0,0127 [m]$	Diámetro exterior del tubo de cobre (ANEXO D).
$N_{tubos} = 21$	Número de tubos dentro del condensador del sistema.

$K_{cobre} = 330 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$	Conductividad del cobre.
Se asume que todo el vapor que llega es el que se va a condensar.	

Para el cálculo del condensador, se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$Q_{evap R134a} = U_{int_c} * A_{int_c} * (T_{sat} - T_{ev}) = 1325 [W] \quad (27)$$

$$U_{int_e} * A_{int_e} = \frac{1}{R_{refri} + R_{pared} + R_{agua}} = 116.5 * 0,1896 = 22,0884 \left[\frac{W}{^\circ C} \right] \quad (28)$$

$$A_{int_e} = \pi * D_{int_e} * L_e * N_{t_e} = \pi * 0,01092 * 0,2632 * 21 = 0,1896 [m^2] \quad (29)$$

$$A_{ext_e} = \pi * D_{ext_e} * L_e * N_{t_e} = \pi * 0,0127 * 0,2632 * 21 = 0,2205 [m^2] \quad (30)$$

$$R_{refri} = \frac{1}{h_{refri} * A_{int_e}} = \frac{1}{118,5 * 0,1896} = 0,04451 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \quad (31)$$

$$R_{pared} = \frac{\ln \left[\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right]}{2 * \pi * K_{cobre} * L_e * N_{tubos}} = 0,00001448 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \quad (32)$$

$$R_{agua} = \frac{1}{h_{agua} * A_{ext_e}} = \frac{1}{5981 * 0,2205} = 0,0007583 \left[\frac{^\circ C}{W} \right] \quad (33)$$

De las correlaciones empleadas en los cálculos de transferencia de calor en el condensador del sistema (agua) indicadas en la tabla 3 en el ANEXO B, se obtiene la longitud efectiva de los tubos en el condensador del sistema.

$$L_{evap} = 0,2632 [m]$$

Dicho dimensionamiento del condensador del sistema se hizo utilizando la ayuda del software EES, para observar detalladamente el código remítase al ANEXO C.

^{*} Para ver la correlación utilizada para este valor remitirse a la tabla 3 del anexo B.

^{**} Para ver la correlación utilizada para este valor remitirse a la tabla 3 del anexo B.

7.4. DISEÑO EXTERNO

Anteriormente en el diseño térmico de los intercambiadores se obtuvo como resultado la longitud de los tubos de cada intercambiador. A continuación, se presentan las ecuaciones y los estándares TEMA para el diseño de intercambiadores de carcasa y tubos.

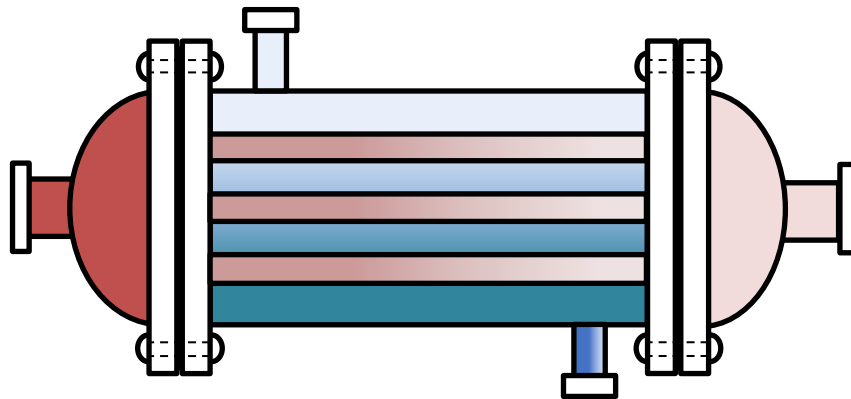
7.4.1. Condensador del sistema. El condensador de agua es un intercambiador de carcasa y tubos horizontal con 21 tubos de cobre, los cuales tienen un diámetro de $\frac{1}{2}$ " y una longitud de transferencia de calor de 27 cm. Su diseño externo se realizará como se muestra en la figura 17.

En la tabla 4 del ANEXO B, se muestran las ecuaciones y relaciones empleadas en los cálculos para el diseño del diámetro de la carcasa en el condensador del sistema (Agua), las cuales se obtuvieron de la sección 3.3.5. llamada datos de entrada y prácticas recomendadas del Heat Exchanger Design Handbook (HEDH) de E.U. Schlunder. Dichos cálculos se hicieron utilizando la ayuda del software EES, para observar detalladamente el código remítase al ANEXO C.

Los resultados de los cálculos son:

- Longitud nominal de los tubos: $L_{t o_e} = 0.2632 [m] \approx 27 [cm]$
- Diámetro interno de la carcasa: $D_{s_e} = 0.1905 [m] \approx 20 [cm]$

Figura 17. Diseño externo del condensador del sistema (agua).



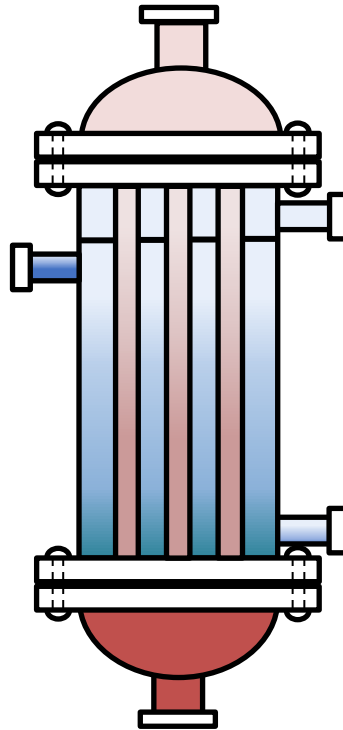
7.4.2. Evaporador del sistema. El evaporador de agua es un intercambiador de carcasa y tubos vertical con 41 tubos de cobre, los cuales tienen un diámetro de $\frac{1}{2}$ ' y una longitud de transferencia de calor de 56 cm. Su diseño externo se realizará como se muestra en la figura 18.

En la tabla 5 del ANEXO B, se muestran las ecuaciones y relaciones empleadas en los cálculos para el diseño del diámetro de la carcasa en el evaporador del sistema (Agua), las cuales se obtuvieron de la sección 3.3.5. llamada datos de entrada y prácticas recomendadas del Heat Exchanger Design Handbook (HEDH) de E.U. Schlunder. Dichos cálculos se hicieron utilizando la ayuda del software EES, para observar detalladamente el código remítase al ANEXO C.

Los resultados de los cálculos son:

- Longitud nominal de los tubos: $L_{t_{o_c}} = 0.5502 \text{ [m]} \approx 56 \text{ [cm]}$
- Diámetro interno de la carcasa: $D_{s_c} = 0.1905 \text{ [m]} \approx 20 \text{ [cm]}$

Figura 18. Diseño externo del evaporador del sistema (agua).



7.5. SELECCIÓN DE COMPONENTES

7.5.1. Compresor. Para seleccionar el compresor empleado en la bomba de calor se requieren los siguientes datos:

Tabla 9. Parámetros para seleccionar el compresor.

Parámetro	Símbolo	Valor	
Temperatura de condensación del refrigerante	T_cond	52.77 [°C]	127 [°F]
Temperatura de evaporación del refrigerante	T_ev	-10.98 [°C]	12.2 [°F]
Capacidad de enfriamiento del evaporador de refrigerante	Q_ev	1428 [Watts]	4872 [Btu/h]
Trabajo del compresor	W	438.3 [watts]	0.59 [HP]

Mediante estos parámetros es posible seleccionar un compresor de cualquier marca ya que son los parámetros de funcionamiento de la bomba de calor.

En este caso se ha seleccionado un compresor recíprocante de la marca Danfoss, cuya referencia es GS30TG para funcionar con gas refrigerante 134^a. El catálogo para la selección del compresor se encuentra en el ANEXO D.

Danfoss Light Commercial Refrigeration Compressors

		R134a (*) HBP HMBP																	
COMPRESSOR MODEL	DANFOSS CODE (R)	POWER		MOTOR TYPE	VOLTAGE FREQUENCY	APPLICATION	COMPRESSOR COOLING	REFRIGERATION CAPACITY						WEIGHT	DESIGN				
		cm ³	hp					ASHRAE conditions Condensing temperature = 131°F (55°C)											
								+20°F (-6.7°C)			+45°F (+7.2°C)								
		+14°F (-10°C)		Cooling Capacity		COP		EER		Cooling Capacity		COP		EER					
		Btu/h		W		Btu/h		W		W/W		Btu/Wh		Btu/h		W		W/W	
GX18TG	123B1545	18.40	1/2	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	3107	911	3671	1076	1.58	5.37	6643	1947	2.17	7.42	35.1	Xc
GX23TG	123B1548	23.20	5/8	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	3889	1140	4584	1343	1.47	5.00	8260	2421	1.98	6.77	37.5	Xd
GS26TG	123B1550	25.93	3/4	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	4325	1268	5241	1536	1.69	5.77	9926	2909	2.40	8.20	50.0	Sc
GS30TG	123B1553	29.95	7/8	CSR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	4881	1430	5975	1751	1.78	6.08	11833	3468	2.61	8.90	50.7	Sd
GS34TG	123B1614	34.42	1	CSR	220-230V 60Hz	HMBP	Fan	5069	1486	6957	2039	1.77	6.05	12407	3636	2.18	7.44	49.2	Sd
GS34TF	123B1590	34.42	1	CSR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	6310	1849	7510	2201	1.86	6.36	13580	3980	2.50	8.20	50.0	Sd
GS26T3	123B1551	25.93	3/4	3PH	440V 60 Hz	HMBP	Fan	4325	1268	5241	1536	1.76	5.98	9926	2909	2.40	8.20	50.0	Sd

7.5.2. Válvula de expansión termostática. Se ha seleccionado una válvula de expansión termostática Danfoss para el funcionamiento de la bomba de calor ya que al realizar el cálculo de la longitud de un tubo capilar para realizar la expansión resultaba ser mayor a 7 metros debido a la capacidad del sistema de casi 1 tonelada de refrigeración. Lo primero que se selecciona es el cuerpo de la válvula, en este caso se ha seleccionado una válvula con ecualizador interno para R134a, con el fin de buscar algo compacto y de fácil instalación.

1. Select Valve Body

Equalization	R-22	R-407C	R-404A	R-134a
Internal	068Z3206		068Z3400	068Z3346
External	068Z3209		068Z3403	068Z3348

Seguido a esto se selecciona el orificio de la válvula, para esto se debe buscar la tabla que corresponde en el catálogo al refrigerante con el que se desea trabajar, la temperatura de evaporación y la capacidad del evaporador que en este caso es cerca de una tonelada de refrigeración es por eso que se ha seleccionado la siguiente, es decir 1 ½ tons, dando como resultado un orificio N° 3 para el buen funcionamiento de la válvula de expansión termostática en el sistema. El catálogo para la selección de la VET se encuentra en el ANEXO D.

2. Select Orifice

R-134a			Evaporator temperature (°F)										
Orifice size	Danfoss Code No.	Nominal capacity of installed valve ¹ (tons)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	
			Rated capacity ² (tons)										
0X	068-2002	½	¼	¼	¼	¼	¼	½	½	½	½	½	
00	068-2003	½	¼	¼	¼	¼	¼	¼	¼	½	½	½	
01	068-2010	½	¼	¼	¼	¼	¼	½	½	½	½	½	
02	068-2015	¾	¼	¼	¼	¼	¼	½	½	½	¾	¾	
03	068-2006	1 ½	½	½	½	½	¾	¾	1	1	1 ¼	1 ½	
04	068-2007	1 ¾	½	½	¾	¾	1	1 ¼	1 ½	1 ½	1 ¾	2	
05	068-2008	2 ½	¾	¾	1	1	1 ½	1 ½	1 ¾	2	2 ½	2 ½	
06	068-2009	3	¾	1	1 ¼	1 ½	1 ½	2	2 ¼	2 ½	2 ¾	3	

7.5.3. Condensador auxiliar del sistema. Se selecciona un condensador auxiliar, el cual tiene la función de retirar del líquido refrigerante el calor que es adquirido al pasar por el compresor o en el proceso de compresión puesto que el compresor no es hermético, se debe seleccionar con la capacidad de calor que corresponda según el balance de energía, por lo general es un poco menor al trabajo realizado por el compresor. En este caso se compra un condensador de capacidad de 516 watts, intercambiador refrigerante – aire, tipo serpentín con aletas.

8. CONSTRUCCIÓN

A partir de los cálculos realizados se obtiene el dimensionamiento para la posterior fabricación de los dos intercambiadores de calor y la estructura que soportará los diversos componentes. Los planos del prototipo se encuentran en el ANEXO E.

8.1. ESTRUCTURA.

La estructura brinda robustez mecánica, puesto que es la encargada de soportar los componentes del equipo, como se puede observar en la figura 19. La estructura cuenta con una plataforma de la cual sale un perfil en U que sirve como soporte para el intercambiador vertical y un perfil cuadrado como base para el intercambiador horizontal, el compresor, el filtro de aceite y el tablero de control. La estructura también cuenta con ruedas capaces de soportar el peso del equipo y que a su vez facilitan el desplazamiento de este.

Figura 19. Estructura del sistema de evaporación.



8.2. INTERCAMBIADORES DEL SISTEMA

Los intercambiadores del sistema, uno encargado de evaporar el volumen de agua y otro encargado de condensar el vapor de agua, se construyeron con cuerpo en tubería de acero inoxidable 304 de 6" Schedule 10S al igual que las tapas, puesto que estos espesores fueron los que se obtuvieron del resultado del diseño mecánico para soportar el vacío requerido en el funcionamiento del equipo.

La longitud de los intercambiadores está definida por el diseño térmico y el diseño mecánico puesto que se debe tener presente la longitud efectiva de transferencia de calor como base para determinar la longitud en el diseño por presiones y vacío, es la misma longitud que se requiere para la tubería de cobre al interior de los intercambiadores, los cuales se fijaron mediante un proceso de expansión mecánica a la placa de tubos en acero inoxidable, cuyo espesor se determinó también en el diseño mecánico.

Figura 20. Haz de tubos de cobre al interior del intercambiador.



Figura 21. Herramienta empleada en la expansión mecánica del haz de tubos de cobre.



La unión de las tapas al cuerpo de los intercambiadores se realizó mediante bridas, de $\frac{1}{4}$ " en las tapas y $\frac{3}{8}$ " en el cuerpo, ajustado mediante 10 pernos el intercambiador pequeño y 20 pernos galvanizados el intercambiador grande, de diámetro de $\frac{1}{2}$ " como se observa en la figura 23. Con empaque de nitrilo atoxico.

Figura 22. Empaque de nitrilo atoxico



Figura 23. Bridas de cada intercambiador.



Cada tapa cuenta con una perforación en la parte superior de media pulgada, puesto que ahí se realiza la unión del sistema con la bomba de calor, y así realizar la entrada o salida del refrigerante al haz de tubos de cada intercambiador. También se realizó una perforación de 2" en el cuerpo de cada intercambiador para realizar la unión de cada uno de ellos para poner la tubería del vapor. Como se observa en la figura 24.

Figura 24. Tubería de vapor.



El intercambiador vertical cuenta con un indicador de nivel tipo caldera para poder observar el cambio en el nivel de agua y poder realizar un llenado en caso de realizar un funcionamiento continuo o para tomar la relación de generación de vapor con el tiempo. Como se muestra en la figura 25.

Figura 25. Indicador de nivel.



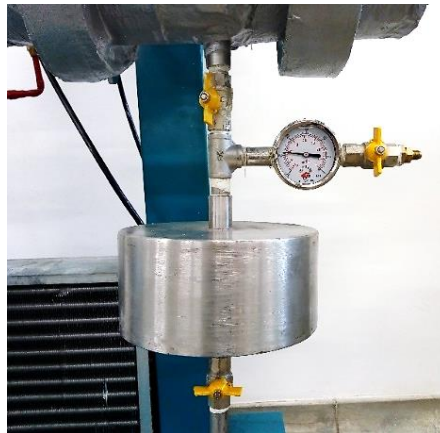
El intercambiador vertical cuenta con un orificio de $\frac{1}{2}$ " en la parte superior del cuerpo para permitir la unión del tanque de llenado del sistema. También cuenta con un orificio de $\frac{1}{2}$ " en la parte inferior del cuerpo que tiene como función realizar la purga del intercambiador o la salida del concentrado del sistema una vez finaliza el proceso, como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Unión de carga y descarga del intercambiador grande.



El intercambiador horizontal cuenta también con un orificio de $\frac{1}{2}$ " en el cuerpo para realizar la conexión al tanque de condensado del sistema con capacidad de 6 litros en acero inoxidable 304 de 6" Schedule 10s, figura 27, ya que lo ideal es que en el intercambiador encargado de condensar el vapor no se quede con líquido, en medio del intercambiador horizontal y el tanque de condensado se encuentra la conexión para realizar vacío y el vacuómetro, junto con una válvula para facilitar realizar vacío nuevamente al tanque de condensado una vez se requiera retirar el líquido en el tanque y así asegurar el funcionamiento continuo del sistema.

Figura 27. Conexión del intercambiador pequeño (horizontal) con el tanque de condensado.



8.3. MONTAJE DEL SISTEMA

Finalmente se realiza la unión de cada uno de los componentes seleccionados y fabricados para realizar posteriormente las uniones soldadas y roscadas del circuito de la bomba de calor y proceder a realizar la carga de refrigerante del sistema. Una vez realizada la soldadura y uniones de la bomba de calor se realiza un barrido del sistema para retirar las partículas que pudieron quedar y luego se realiza un vacío en el circuito de bomba de calor para verificar que no existan fugas y realizar luego de 24 horas la carga de refrigerante. En este caso se trabaja con R134a a una carga de 64 psi.

Figura 28. Sistema de evaporación de aguas residuales.



9. PRUEBAS

Con el objeto de comprobar el estado mecánico, funcionamiento y desempeño del prototipo construido se proceden a realizar diferentes pruebas, las cuales se pueden clasificar en tres grupos. Las pruebas de ensamblaje que se refieren a los chequeos de construcción de cada uno de los componentes para poner en funcionamiento el equipo sin fallas por fugas o resistencia mecánica, las pruebas de operación para verificar los parámetros de funcionamiento del equipo con diferentes fluidos teniendo en cuenta la producción y las pruebas de análisis fisicoquímico que consisten en analizar las concentraciones de los diversos componentes que caracterizan el agua que ingresa y sale del equipo.

9.1. PRUEBAS DE ENSAMBLAJE

Estas pruebas se hacen para verificar la hermeticidad del recipiente, sometiéndolo a una diferencia de presiones entre su interior y exterior. Utilizando un fluido que puede ser agua o aire.

9.1.1. Prueba de estanqueidad en el evaporador y condensador de agua de forma individual. Se realizan pruebas de forma independiente con el fin de identificar fugas y ajustar las bridas para garantizar el sello, las presiones y los fluidos de prueba para cada uno de los lados de los intercambiadores se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Pruebas de estanqueidad en el sistema de agua.

Equipo	Lado de prueba	Presión [psi]	Fluido de prueba	Tiempo [horas]	Método de Inspección
Evaporador	Tubos	250	Agua	4	Visual.
	Casco	30	Aire comprimido	4	Solución jabonosa y equipo sumergido.
Condensador	Tubos	60	Agua	4	Visual
	Casco	32	Aire comprimido	4	Solución jabonosa y equipo sumergido.

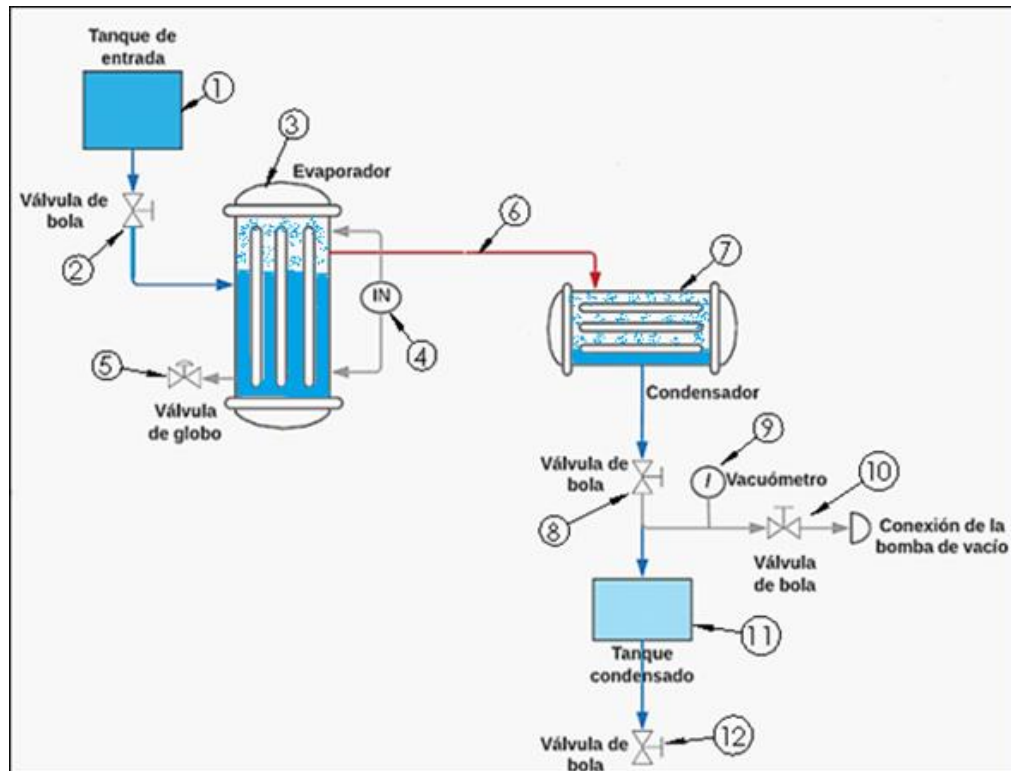
9.1.2. Prueba de estanqueidad del sistema total para el lado de agua.

Verificados los intercambiadores de forma independiente, se procede al ensamblaje del sistema total para el lado agua (figura 29) y se verifica que no existan fugas en las uniones mediante la presurización del sistema, tabla 11.

Tabla 11. Prueba de estanqueidad en el sistema de agua ensamblado.

Presión [psi]	Fluido de prueba	Tiempo [horas]	Método de Inspección
32	Aire comprimido	24	Solución jabonosa

Figura 29. Sistema de agua.

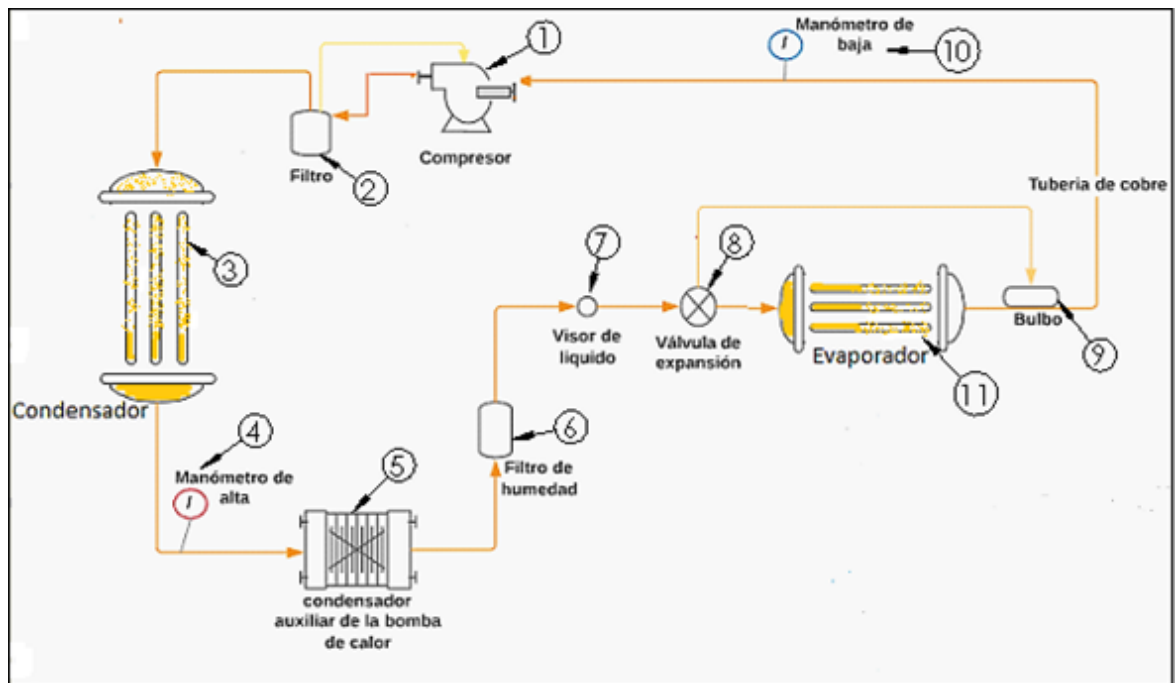


9.1.3. Prueba de estanqueidad en el sistema de refrigeración. Se verifica que el sistema de refrigeración, figura 30, (evaporador, condensador, válvula de expansión, condensador auxiliar y compresor) no tenga fugas previas a la carga del refrigerante, por la prueba en la tabla 12. Terminadas las pruebas se realizó la carga del refrigerante.

Tabla 12. Pruebas en el sistema integral, lado refrigerante.

Presión	Fluido de prueba	Tiempo [horas]	Método de Inspección
70 [psi]	Nitrógeno	24	Solución jabonosa
30 [in hg]	Vacío	15	manómetro

Figura 30. Sistema de refrigerante.



9.2. PRUEBAS OPERACIONALES

Tienen como objetivo observar el comportamiento del sistema durante el proceso de evaporación e identificar los factores que más afectan la producción de vapor, se empleó agua potable en algunas pruebas preliminares para identificar los parámetros más importantes que determinan la velocidad de conversión de agua residual en agua libre de contaminantes a través del proceso de evapo-condensación, esto para no considerar inicialmente el efecto de la contaminación del agua a tratar. Como resultado de la observación del comportamiento del sistema durante estas pruebas iniciales se identificaron los siguientes parámetros como determinantes en el incremento o disminución de la velocidad de producción de agua tratada:

- Nivel de agua en el evaporador del sistema.
- Presión de vacío.
- Presión de alta en el sistema de refrigeración.

El periodo transitorio requerido para que el sistema empiece a producir en forma continua agua tratada no es relevante para la valoración del desempeño a largo plazo del sistema, puesto que solo se requiere de un tiempo aproximado de una hora o menos dependiendo de la temperatura de ingreso del agua residual que ingresa inicialmente al sistema para que se alcance la temperatura de saturación correspondiente al vacío del sistema establecido.

9.2.1. Pruebas preliminares. Consisten en pruebas realizadas con agua potable por diferentes periodos de tiempo donde se identifican según el desempeño de la prueba los factores que de forma significativa alteran la producción de vapor, la cual está definida por el flujo de transferencia de calor suministrada, es decir:

$$Q = \dot{m}_{vapor} * H_{fg} \quad (34)$$

$$Q = U * A_{efectiva} * (T_{cond_{R134a}} - T_{sat_{agua}}) \quad (35)$$

Los factores identificados en estas pruebas fueron el nivel óptimo de agua en el evaporador, es decir el área efectiva de flujo de calor, las variaciones en la velocidad del condensador auxiliar que sirve para regular la presión de condensación del refrigerante en el sistema de refrigeración afectando la temperatura de condensación del refrigerante y la presión de vacío afectando la temperatura de saturación del agua y la entalpía de vaporización de la misma. La variación de la temperatura de condensación del refrigerante y la temperatura de saturación del agua afectan el flujo de calor al variar el diferencial de temperatura ($T_{cond_{R134a}} - T_{sat_{agua}}$).

9.2.1.1. Prueba 1. Efecto del nivel de agua en el evaporador.

Condiciones de la prueba:

- Tipo de agua: potable.
- Nivel inicial de agua 5,5 litros.
- Sin restitución de agua.
- Restitución de la presión de vacío.
- Temperatura de ingreso del agua 23°C.
- Tiempo de prueba 4h 20 min.
- Control de la presión de alta a través del condensador auxiliar.

Procedimiento de prueba:

- Se realiza vacío al sistema hasta 25 in Hg.
- Se llena el evaporador hasta el nivel de 5,5 lts.
- Se enciende el compresor.
- Se realiza toma de datos cada 10 min.
- Se realiza restitución de vacío para mantener el nivel en 25 in Hg.
- Para evitar daños en el compresor y mantener el sistema funcionando en un rango de presiones se enciende el post condensador cuando la presión sobrepasa los 220 psi.

Resultados

Las figuras 31, 32, 33 y 34 muestran el comportamiento del sistema producto de la variación del nivel del agua en el evaporador a medida que esta se va transformando en vapor y pasa al condensador sin que se restituya el nivel con la alimentación de agua nueva a tratar.

Se observa en la figura 31 que, al disminuir el nivel de agua en el evaporador del sistema, simultáneamente se reduce la producción de forma escalonada. El efecto del nivel de agua en el evaporador afecta directamente el área efectiva de transferencia en el evaporador del sistema.

Producto de la variación de la cantidad de vapor producido debido a la disminución del área efectiva de transferencia en el evaporador de agua, la carga térmica sobre el condensador del sistema de refrigeración también se disminuye, produciéndose una tendencia a la disminución de la temperatura del refrigerante en el condensador, como en este caso no se desea evaluar el efecto de esta temperatura, la presión del condensador se trata de mantener constante mediante la manipulación (manual) de la velocidad del ventilador del condensador auxiliar que se dispone para esta esta función.

Las variaciones que se observan en la presión de alta, figura 32, entre los 80 minutos y los 110 minutos se deben a un proceso transitorio del sistema de refrigeración una vez se enciende el ventilador del condensador auxiliar, mientras que las variaciones a partir de los 110 minutos se deben al proceso de regulación (manual) de la presión por medio de la velocidad del ventilador en el condensador auxiliar.

Finalizada la prueba se obtuvo un condensado de agua de 3 litros en el periodo de tiempo de 270 minutos.

Figura 31. Efecto del nivel de agua en el evaporador en la producción.

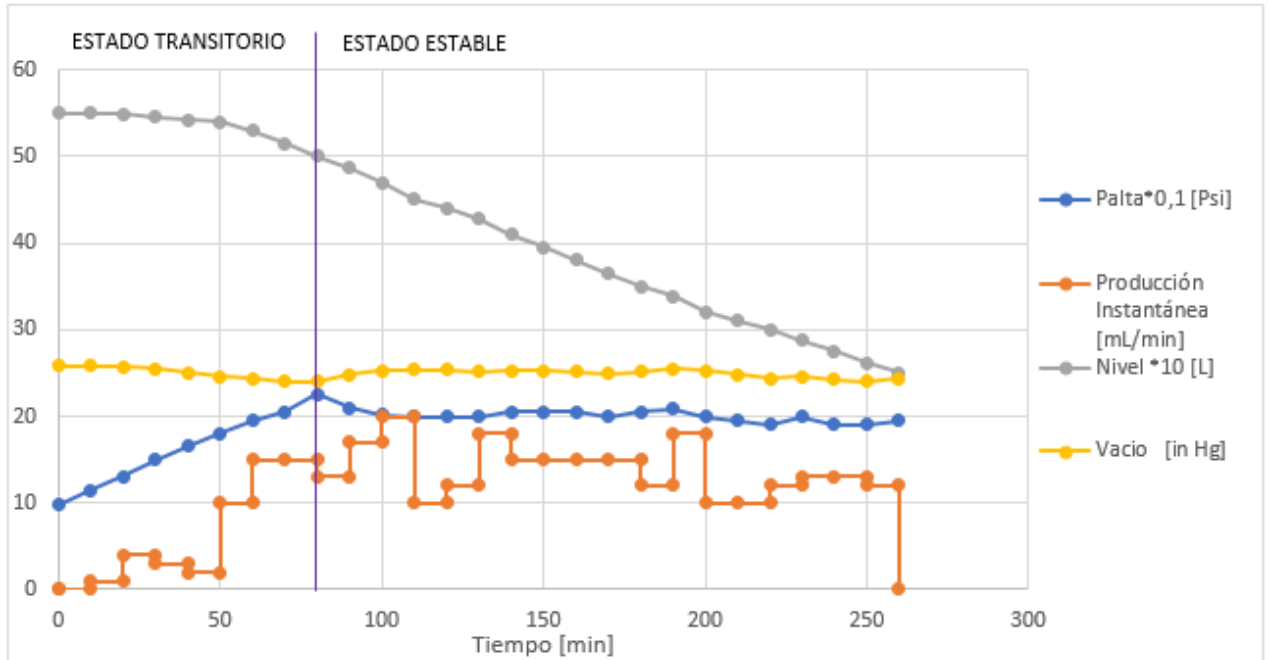


Figura 32. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.

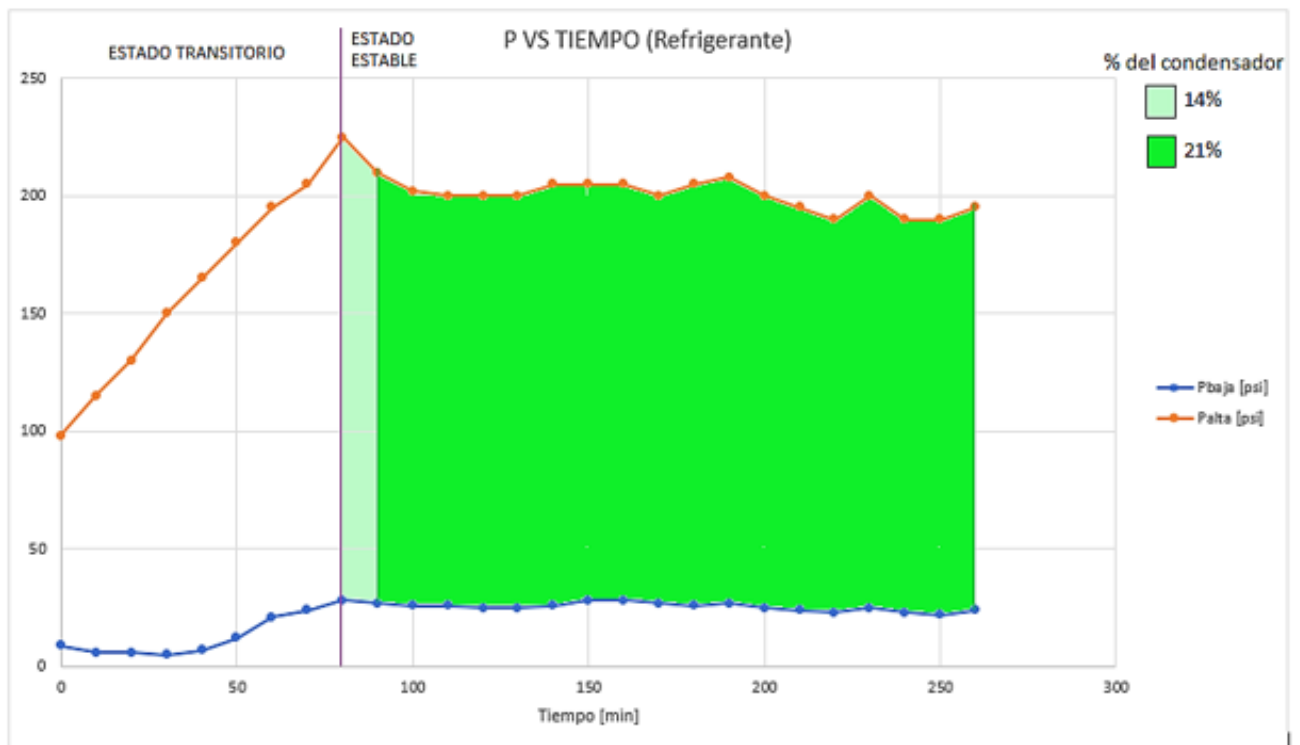


Figura 33. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.

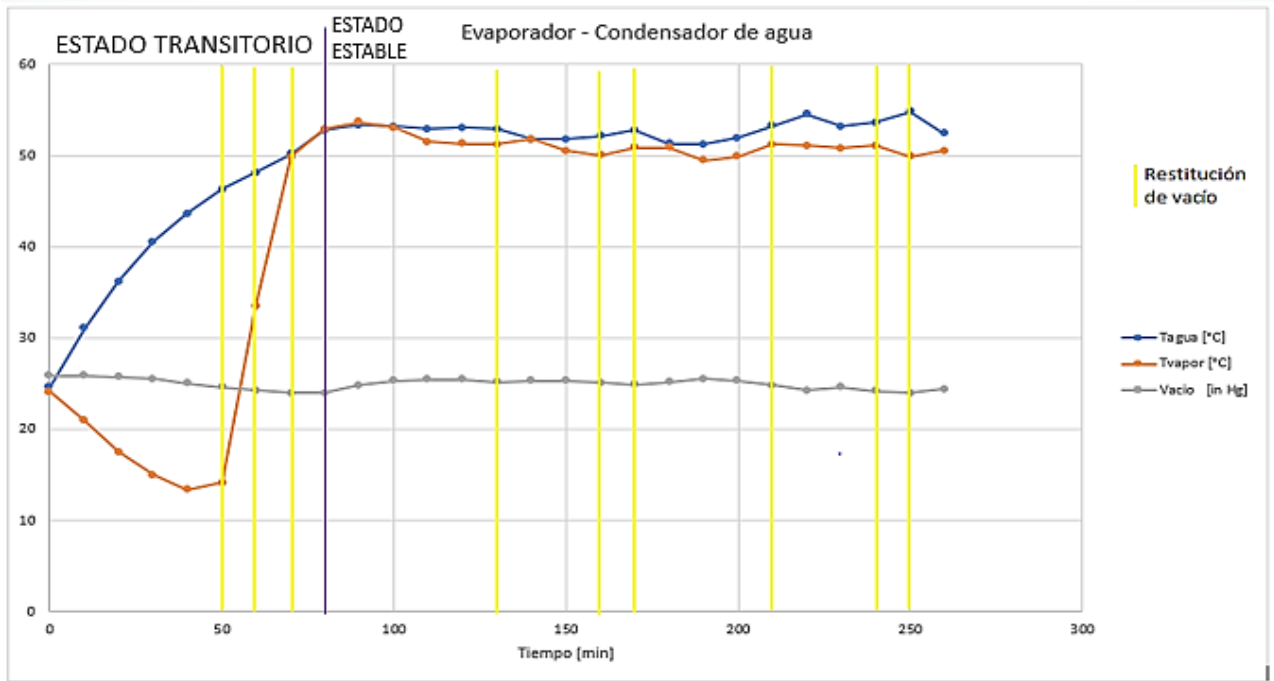
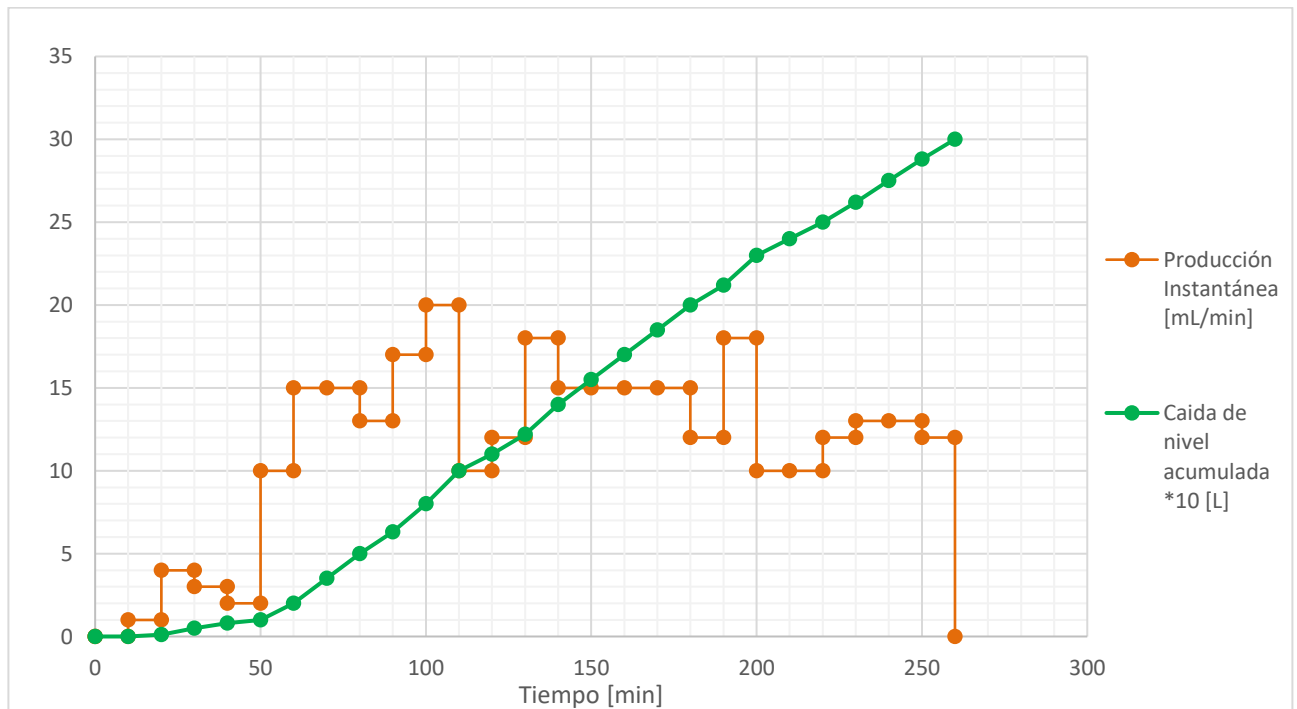


Figura 34. Producción de vapor instantánea y caída del nivel acumulada en el tiempo.



9.2.1.2. Prueba 2. Efecto de la presión de vacío en el sistema.

Condiciones de la prueba:

- Tipo de agua: potable.
- Nivel inicial de agua 5,5 litros.
- Restitución de agua.
- Temperatura de ingreso del agua 23°C.
- Tiempo de prueba 4h 30 min.
- Control de la presión de alta a través del condensador auxiliar.

Procedimiento de prueba:

- Se realiza vacío al sistema hasta 25 in Hg
- Se llena el evaporador hasta el nivel de 5,5 lts.
- Se enciende el compresor.
- Se realiza toma de datos cada 10 min.
- Se realiza restitución de agua cada 10 min
- Para evitar daños en el compresor y mantener el sistema funcionando en un rango de presiones se enciende el post condensador cuando la presión sobrepasa los 220 psi.

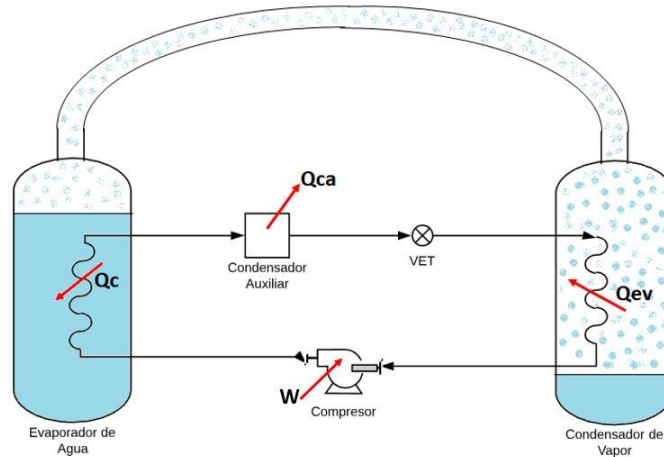
Resultados

Dado que el suministro de calor proviene de la operación del sistema de refrigeración como bomba de calor existe una diferencia entre el calor aportado por el refrigerante para vaporizar el agua con relación al calor aportado para condensarla como se observa en la ecuación 36, esto genera una tendencia al aumento de la presión del agua en el evaporador (disminución de la presión de vacío) pues la velocidad de producción de vapor no es igual a la velocidad de condensación, esta tendencia puede ser controlada mediante la utilización de un condensador auxiliar en el sistema de refrigeración como se muestra en la figura 35.

$$Q_{condensador} = Q_{evaporador} + W_{compresor} \quad (36)$$

$$Q_{cond} - Q_{cond Aux} = Q_{evap}$$

Figura 35. Diagrama de flujos de calor.



La descompensación entre el calor de evaporación determina una tendencia natural del sistema a que se suba la presión de saturación del agua que se evapora (disminución de la presión de vacío) y simultáneamente un incremento en la presión de condensación del refrigerante que podría causar daños en el compresor. El control del incremento en la presión de condensación se logra mediante la regulación de la capacidad de retiro de calor del condensador auxiliar. Mediante esta estrategia se puede regular cualquier nivel de presión deseada en el condensador y por lo tanto el nivel de la presión de vacío en el evaporador.

Las figuras 36, 37, 38 y 39 muestran el comportamiento del sistema producto de la caída de la presión de vacío del conjunto evaporador-condensador de agua. En dicha prueba mediante la regulación del calor retirado en el post condensador se intentó implementar una pequeña disminución artificial (del minuto 90 al 270, figura 36) de la presión de vacío para así observar el efecto en la producción de vapor en el sistema}

En la figura 36 se observa que a medida que disminuye la presión de vacío la velocidad de producción se mantiene baja, alrededor de 9 ml/ min. Esto da la idea de que la disminución de la presión de vacío es bastante negativa para el desempeño del sistema.

Las variaciones que se observan en la presión de alta (figura 37) entre los 80 minutos y los 110 minutos se deben a un proceso transitorio del sistema de refrigeración una vez se enciende el ventilador del condensador auxiliar, mientras que las variaciones a partir de los 110 minutos se deben al proceso de regulación (manual) de la presión buscando la presión de condensación que se requiere.

Finalizada la prueba se obtuvo un condensado de agua de 1.22 litros en el periodo de tiempo de 270 minutos.

Figura 36. Efecto de la presión de vacío en la producción.

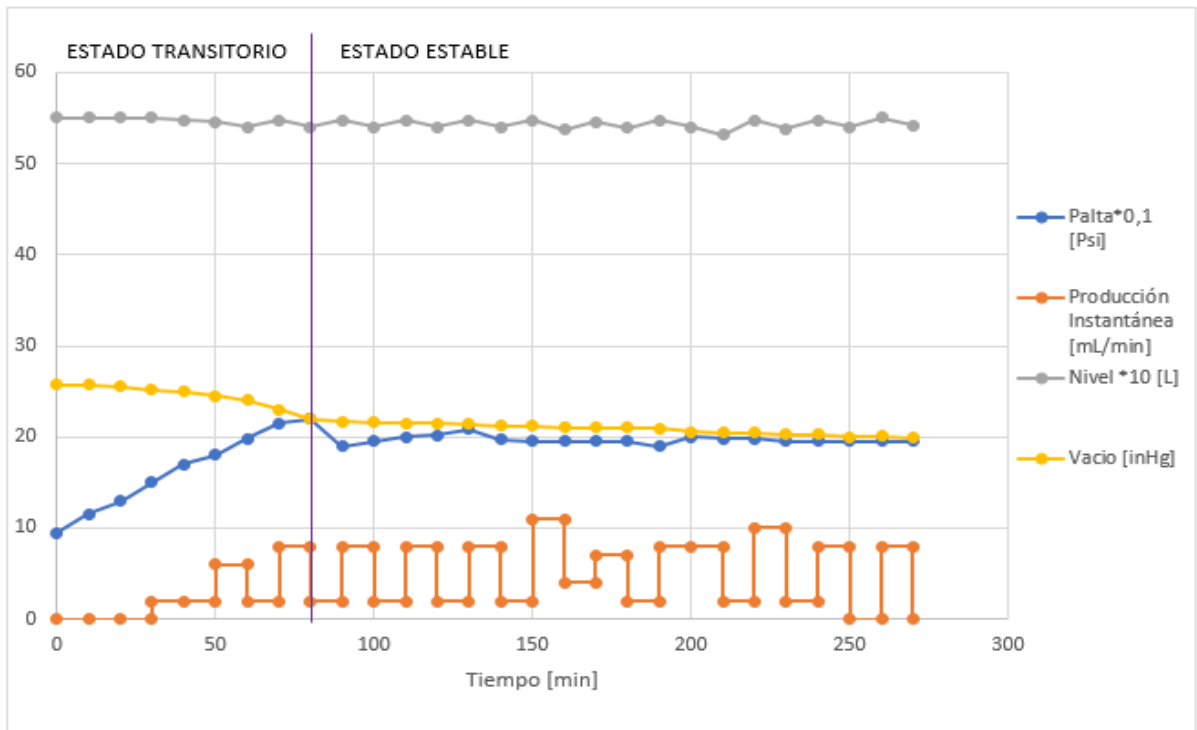


Figura 37. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el post condensador.

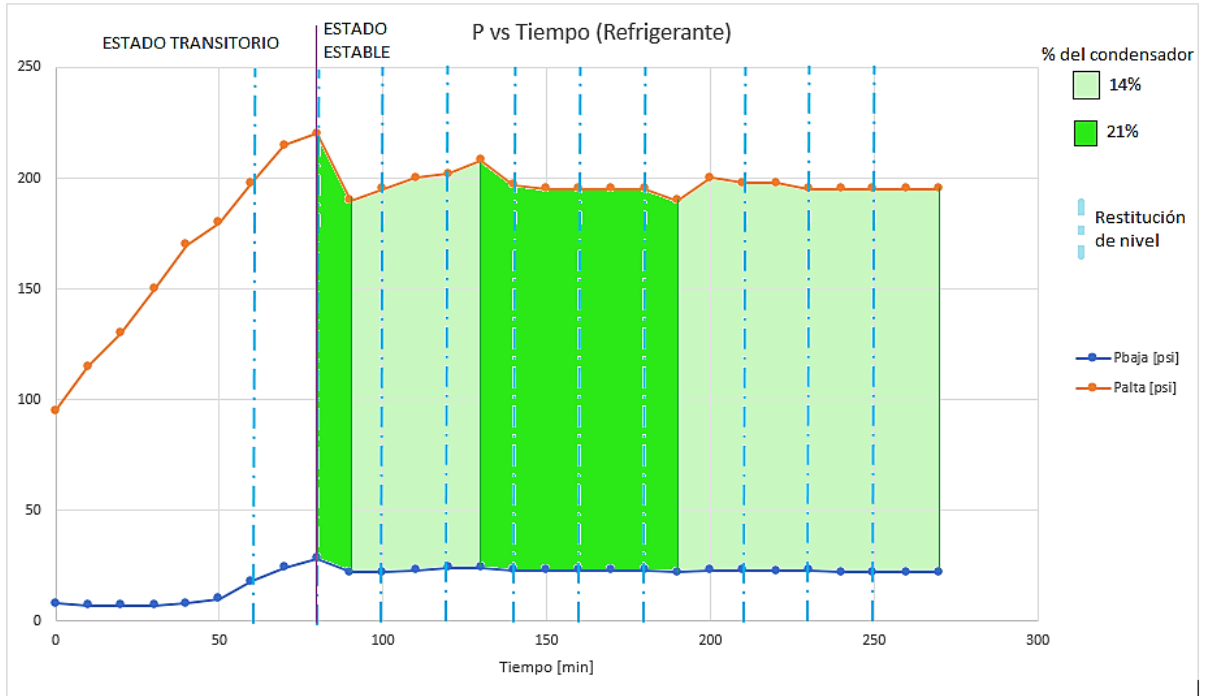


Figura 38. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.

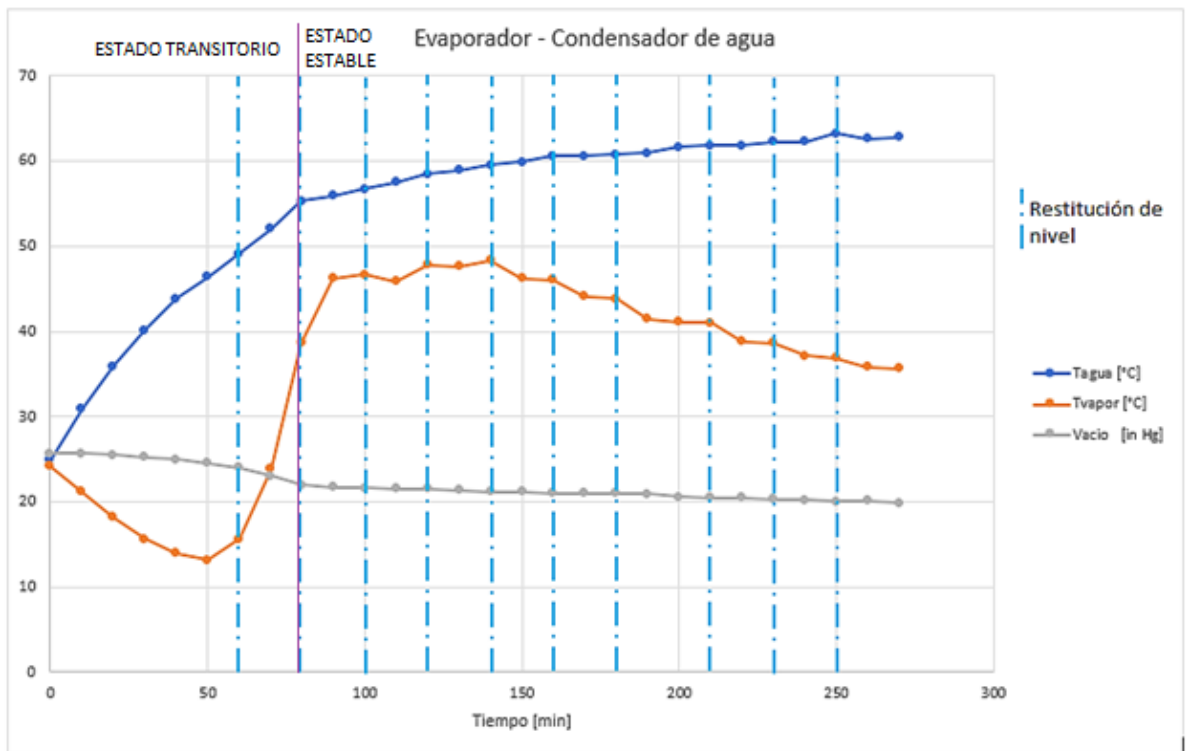
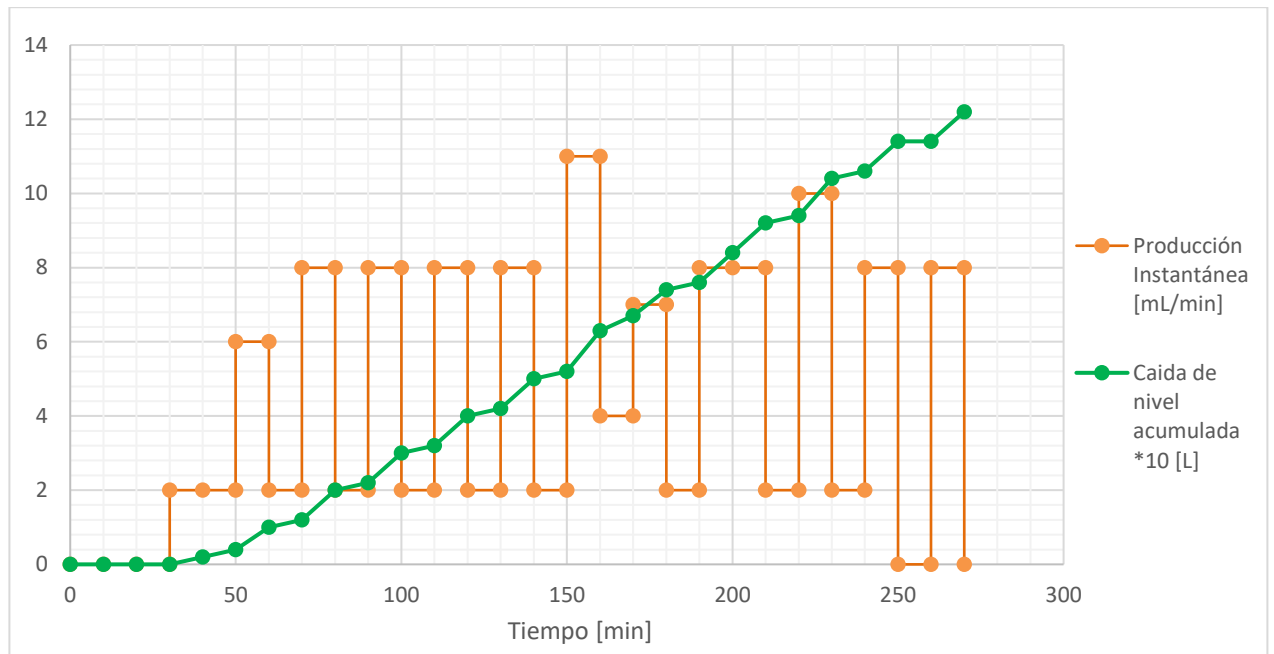


Figura 39. Producción de vapor instantánea y caída del nivel acumulada en el tiempo.



9.2.1.3. Prueba 3. Efecto de la presión de alta en el sistema.

Condiciones de la prueba:

- Tipo de agua: potable.
- Nivel inicial de agua 5,5 litros.
- Restitución de agua.
- Restitución de la presión de vacío.
- Temperatura de ingreso del agua 26°C.
- Tiempo de prueba 4h 40 min.

Procedimiento de prueba:

- Se realiza vacío al sistema hasta 25 in Hg
- Se llena el evaporador hasta el nivel de 5,5 lts.
- Se enciende el compresor.
- Se realiza toma de datos cada 10 min.

- Se realiza restitución de agua cada 10 min
- Se realiza restitución de vacío para mantener el nivel en 25 in Hg.
- Para evitar daños en el compresor y mantener el sistema funcionando en un rango de presiones se enciende el post condensador cuando la presión sobrepasa los 220 psi.

Resultados

Las figuras 40, 41, 42 y 43 muestran el comportamiento del sistema producto de la caída de presión de condensación (alta) del sistema de refrigeración sobre la producción de vapor. La tendencia natural de la presión de condensación es aumentar, por lo cual para evaluar su efecto en el sistema se disminuye y para lograr esto se debe manipular el aumento en la velocidad del ventilador del condensador auxiliar, como se explicó en la prueba 2.

Se observa en la figura 40 que al disminuir la presión de condensación del refrigerante la producción de vapor disminuye de forma escalonada. El efecto de la disminución de la presión de condensación del refrigerante está en la disminución de la temperatura de condensación del refrigerante, afectando el diferencial de temperatura del flujo de calor en el evaporador del sistema.

Las variaciones que se observan en la presión de condensación del refrigerante, figura 41, entre los 60 minutos y los 90 minutos se deben a un proceso transitorio del sistema de refrigeración una vez se enciende el ventilador del condensador auxiliar, pero a partir del minuto 90 se va incrementando gradualmente la velocidad del ventilador del condensador auxiliar para lograr bajar la presión de condensación.

Finalizada la prueba se obtuvo un condensado de agua de 1.84 litros en el periodo de tiempo de 270 minutos.

Figura 40. Efecto de la presión de condensación del refrigerante en la producción.

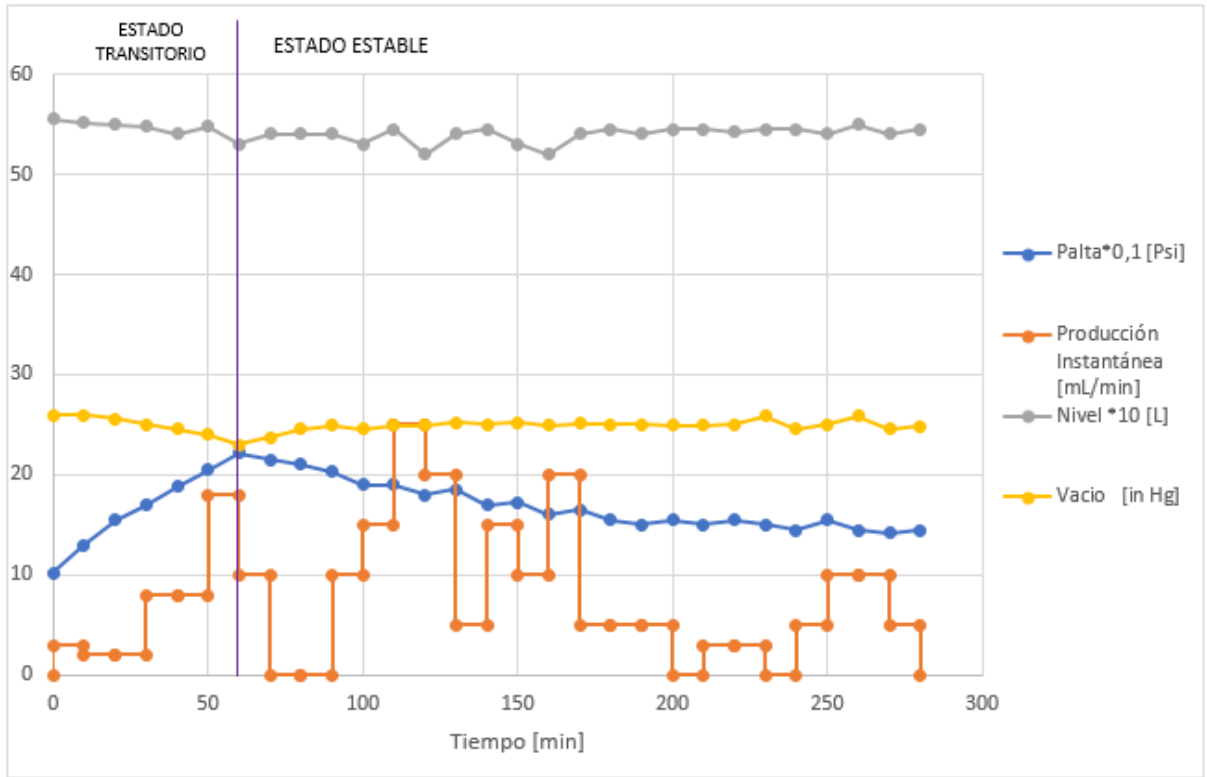


Figura 41. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.

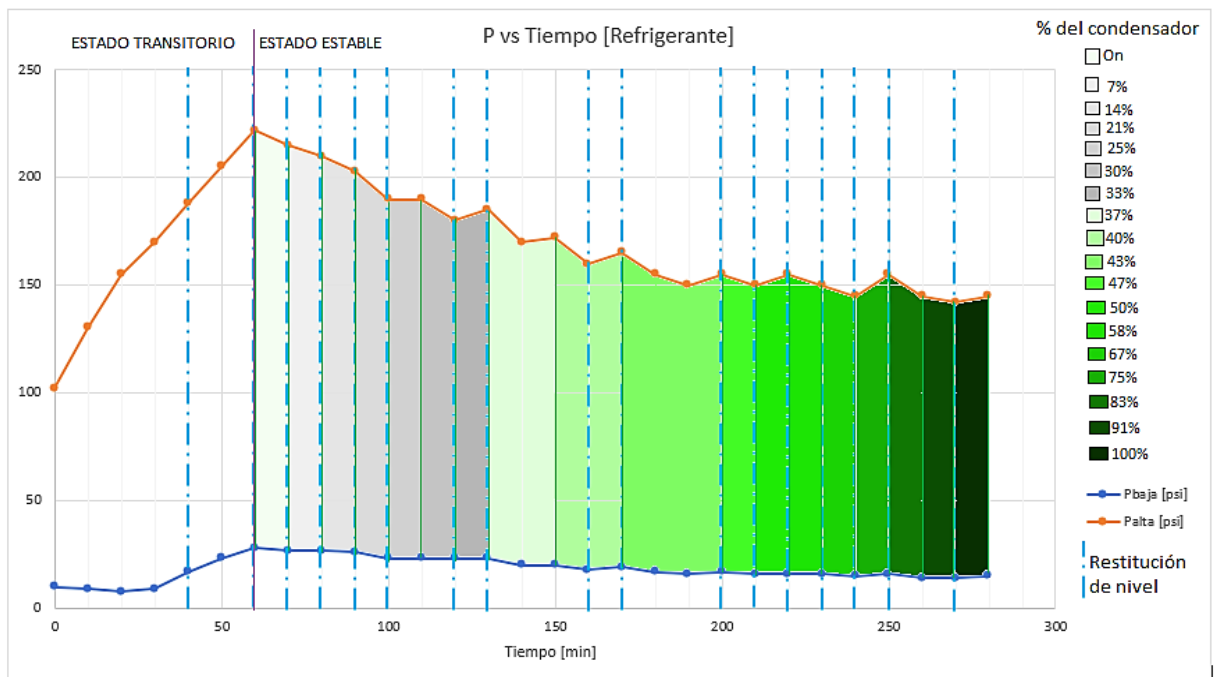
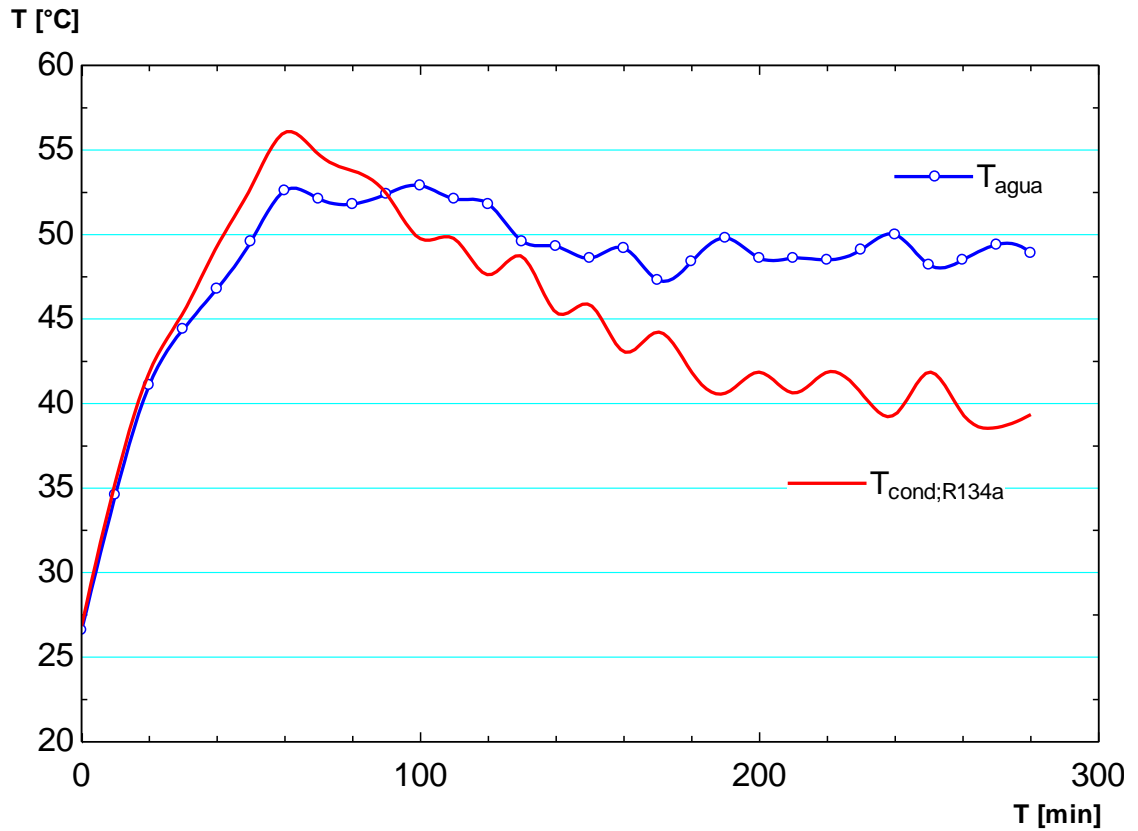


Figura 44. Diferencial de temperatura en el evaporador del sistema.



Análisis

La producción de vapor está determinada por el flujo de calor de la transferencia, es decir los factores área, diferencial de temperatura y coeficiente global de transferencia.

$$Q = U * A_{\text{efectiva}} * (T_{\text{cond}} - T_{\text{agua}}) \quad (37)$$

El efecto de la variación de cada uno de estos factores una vez finalizadas las pruebas, se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Coeficientes involucrados en el flujo de transferencia de calor.

Coeficiente global de transferencia (U)	Área efectiva de transferencia (A)	Diferencia de temperaturas (Tc- Tagua)
El efecto del coeficiente podría verse afectado por la variación en el flujo másico del agua ya que el flujo másico del refrigerante es constante. Se debe encender el condensador auxiliar para mantener regulada la presión según varía el flujo de calor.	Disminuye la producción de vapor a medida que disminuye el nivel de agua ya que cada vez se tiene menor área efectiva de transferencia de calor.	Disminuye la presión de vacío y así mismo disminuye la temperatura de saturación, afectando el diferencial de temperatura siendo este cada vez más pequeño puesto que se mantiene constante la temperatura de condensación.

Para identificar el factor que tiene mayor influencia sobre la producción de agua se realiza el cálculo del líquido total condensado en un mismo periodo de tiempo, 270 minutos, en cada una de las pruebas anteriores, como se muestra en la tabla 14.

Tabla 14. Efecto de la variación de los parámetros que determinan el flujo de calor en el condensado final de cada prueba.

Prueba	Condensado
P1. Disminución del nivel	3 litros
P2. Disminución de la presión de vacío	1,22 litros
P3. Disminución de la presión de alta	1,84 litros

Se observa en la tabla 14 que el factor de mayor influencia sobre la producción de vapor es la presión de vacío, puesto que al aumentar la temperatura de saturación del agua en el evaporador disminuirá su entalpia de vaporización y el diferencial de temperatura del flujo de transferencia de calor.

9.2.2. Prueba real. Consisten en pruebas realizadas con agua avícola por diferentes periodos de tiempo donde se intenta mantener constantes los tres parámetros de influencia por lo que se realiza de forma consecutiva restitución de la presión de vacío, de nivel de agua y las variaciones en la velocidad del condensador auxiliar para mantener la presión de alta constante.

9.2.2.1. Prueba 4. Variación de los parámetros del flujo de calor simultáneamente.

Condiciones:

- Tipo de agua: avícola
- Temperatura de ingreso del agua 23°C
- Nivel inicial de 5,5 lt.
- Rango de restitución de agua 5.5 lts a 5 lts.
- Tiempo de prueba 7h.
- Control de la presión de alta y la velocidad de condensación mediante el condensador auxiliar.
- Restitución de la presión de vacío en 24 in Hg, para mantener la temperatura de saturación constante.
- Toma de datos y extracción de condensado cada 10 min.

Procedimiento de prueba:

- Se realiza vacío al sistema hasta 24 in Hg
- Se llena el evaporador hasta el nivel de 5,5 lts.
- Se enciende el compresor.
- Se realiza toma de datos cada 10 min.
- Se realiza restitución de agua cuando el nivel llega a 5 lts.
- Se realiza restitución de la presión de vacío cuando esta llega a 23 in Hg.

Resultados

Manteniendo los parámetros que determinan el flujo de la transferencia de calor constantes, mejora la producción siendo en este caso de 6,05 litros. Las variaciones que se presentan en la presión de alta, figura 46, se deben a la manipulación de la velocidad del ventilador del condensador auxiliar buscando mantener la presión constante.

Figura 45. Temperaturas del sistema de agua y presión de vacío VS tiempo.

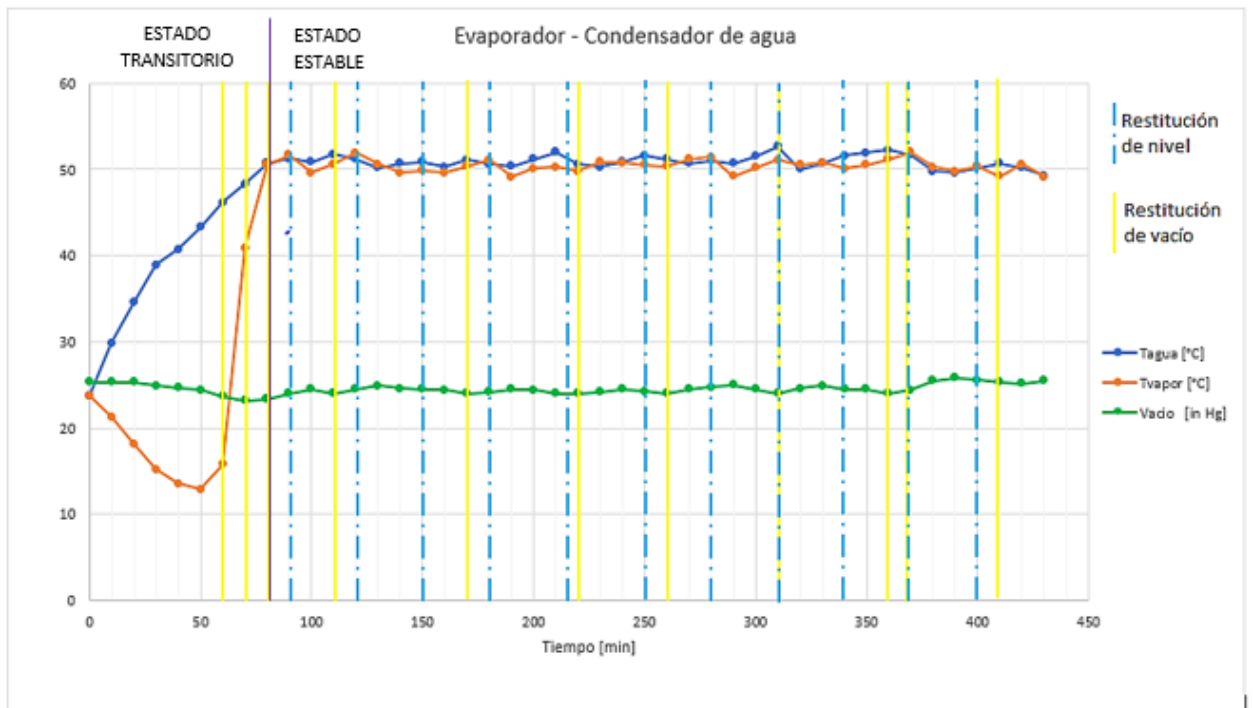


Figura 46. Presión en el sistema de refrigeración con variación de velocidad en el condensador auxiliar.

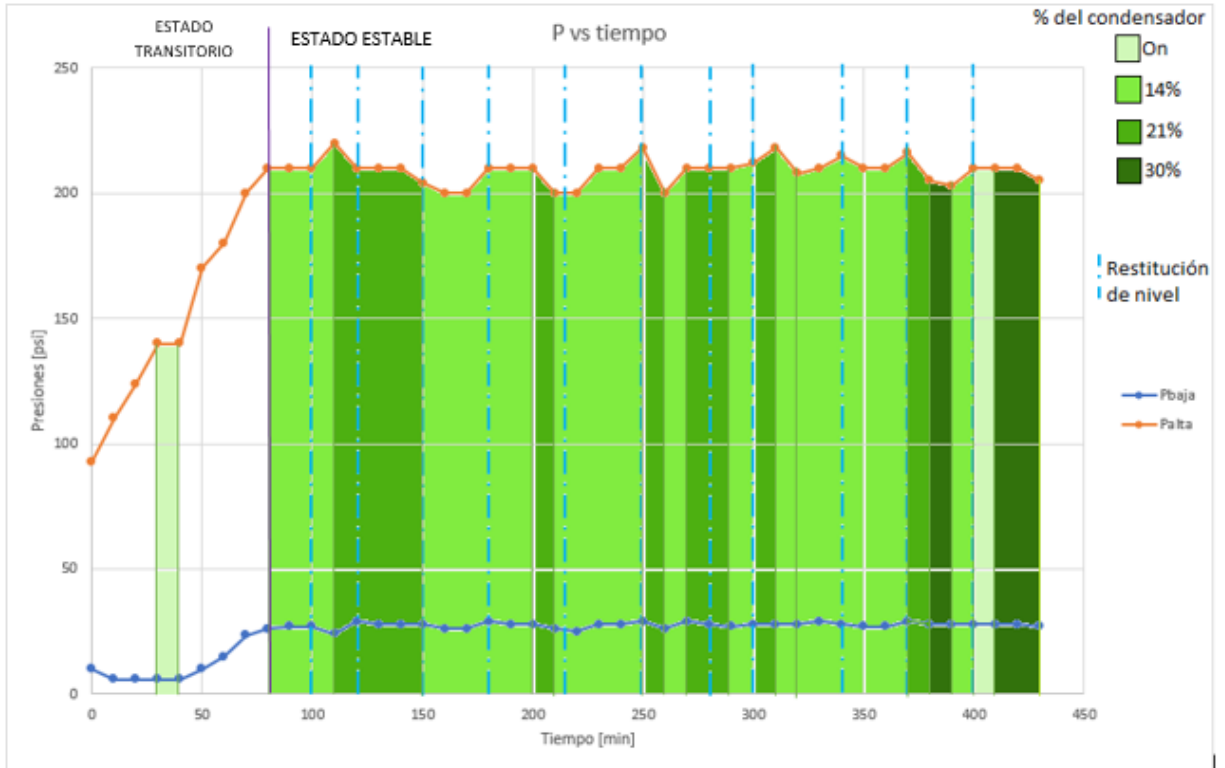


Figura 47. Producción de vapor acumulada en el tiempo.

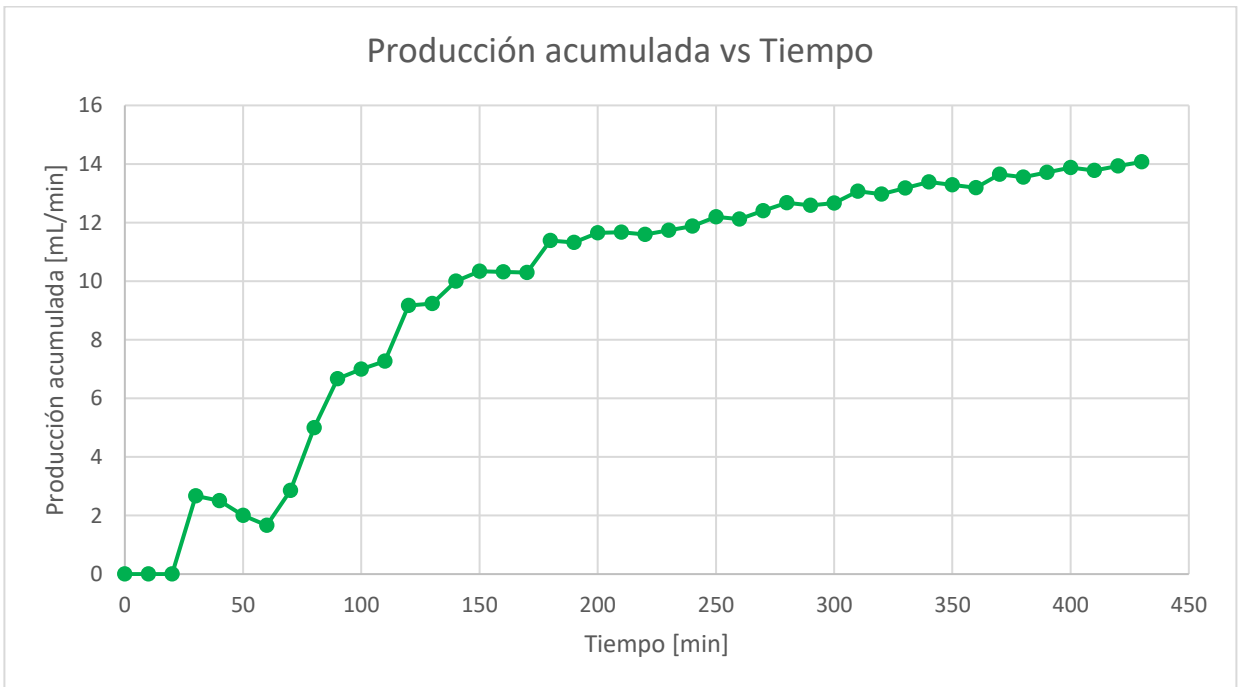
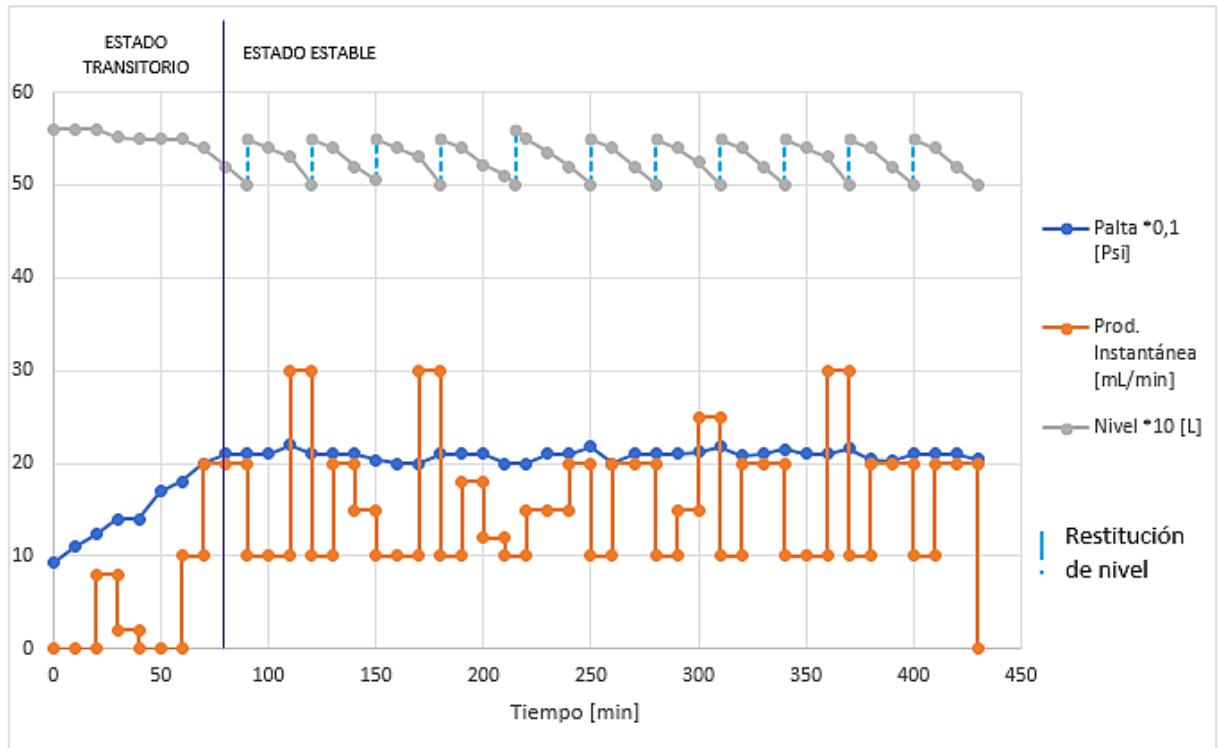


Figura 48. Comparación.



9.2.2.2. Prueba 5. Continuidad en el tratamiento de aguas residuales avícolas.

Condiciones:

- Agua avícola
- Temperatura de ingreso del agua 41°C
- Nivel inicial de 5,5 lt.
- Restitución de agua cuando el nivel baja a 5 lt.
- Tiempo de prueba 12h.
- Control de la presión de alta y la velocidad de condensación mediante el condensador auxiliar.
- Restitución de la presión de vacío para mantener la temperatura de saturación constante.
- Toma de datos y extracción de condensado cada 10 min.

Procedimiento de prueba:

- Se realiza vacío al sistema hasta 24 in Hg
- Se llena el evaporador hasta el nivel de 5,5 lts.
- Se enciende el compresor.
- Se realiza toma de datos cada 10 min.
- Se realiza restitución de agua cuando el nivel llega a 5 lts.
- Se realiza restitución de la presión de vacío cuando esta llega a 23 in Hg.

Resultados

Esta prueba se realiza con agua residual avícola que ingresa a 41°C, temperatura promedio del agua avícola una vez ha sido finalizado su uso. El objetivo es verificar el comportamiento del equipo con agua residual por un periodo de 12 horas tomando como referencia la prueba 4 para realizar comparaciones en los parámetros de funcionamiento.

Al realizar la restitución de agua residual avícola a una temperatura con pocos grados de diferencia de la saturación, la producción de vapor mejora, pues es menor el tiempo que requiere el volumen de agua para absorber energía y elevar pocos grados su temperatura. A lo largo del tiempo, la restitución de agua residual a elevadas temperaturas ayuda a mantener la producción constante cuando ya el sistema se encuentra en estado estable (figura 55).

Al mantener la presión de vacío constante, mediante restituciones de vacío seguidas (figura 50), se logra mantener constante la temperatura de saturación del agua residual por lo cual se tiene una velocidad de producción de vapor igual a la velocidad de condensación del mismo, lo que se observa en la similitud de las temperaturas del agua y del vapor. (figura 49).

También se mantienen constantes las presiones en el sistema de refrigeración, en la línea de baja por la constante producción de vapor y en la línea de alta variando la velocidad del condensador auxiliar.

Figura 49. Temperaturas en el evaporador y condensador del sistema.

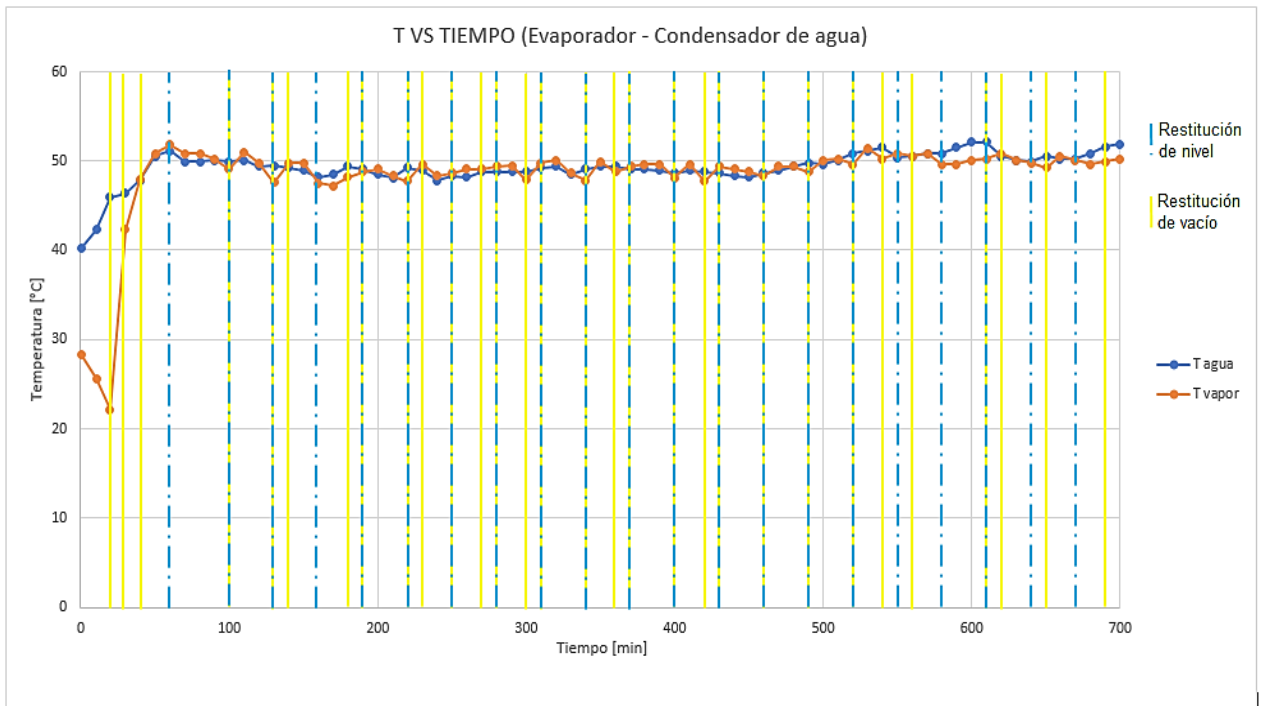


Figura 50. Vacío en el evaporador y condensador del sistema

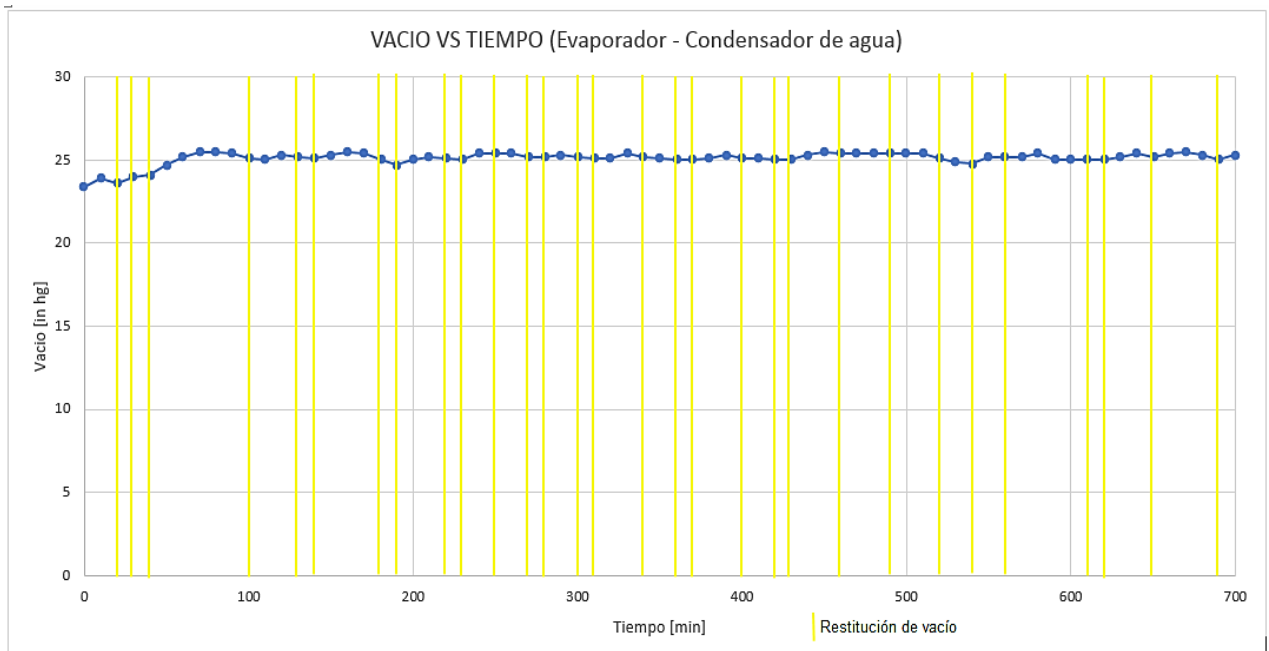


Figura 51. Presión en el sistema de refrigeración.

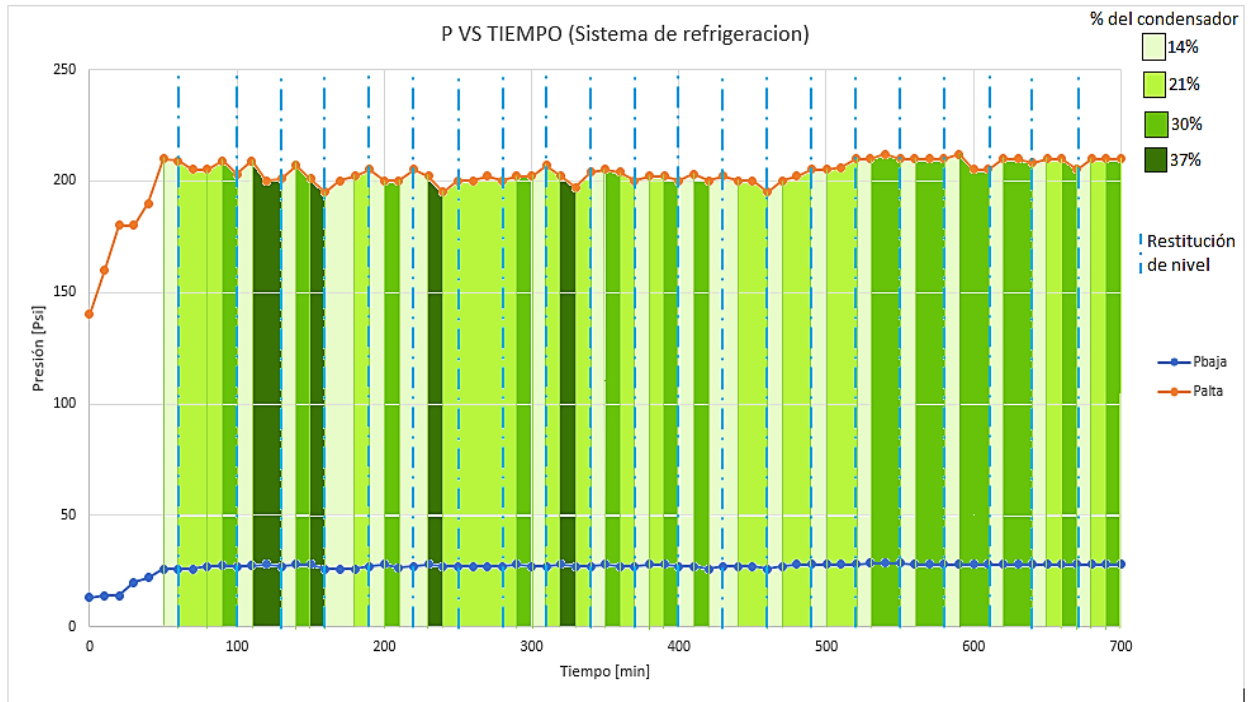


Figura 52. Producción de vapor cada 10 minutos.

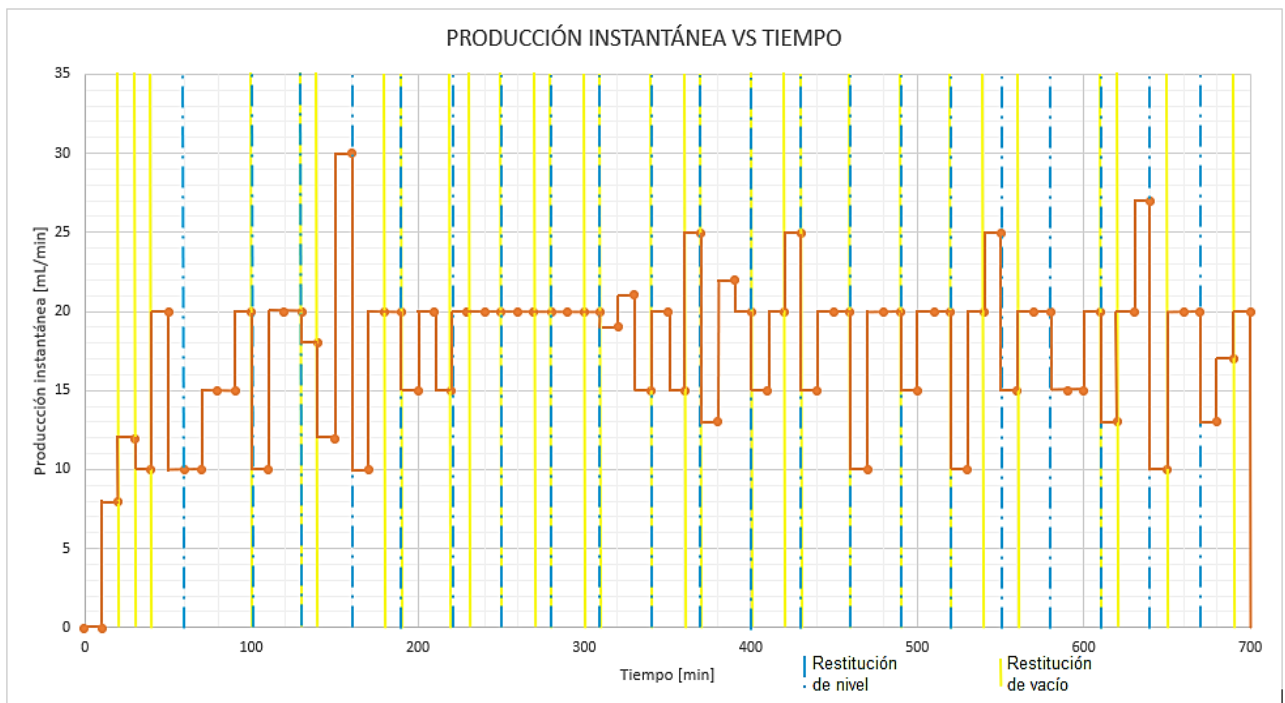


Figura 53. Producción de vapor acumulada en el tiempo.

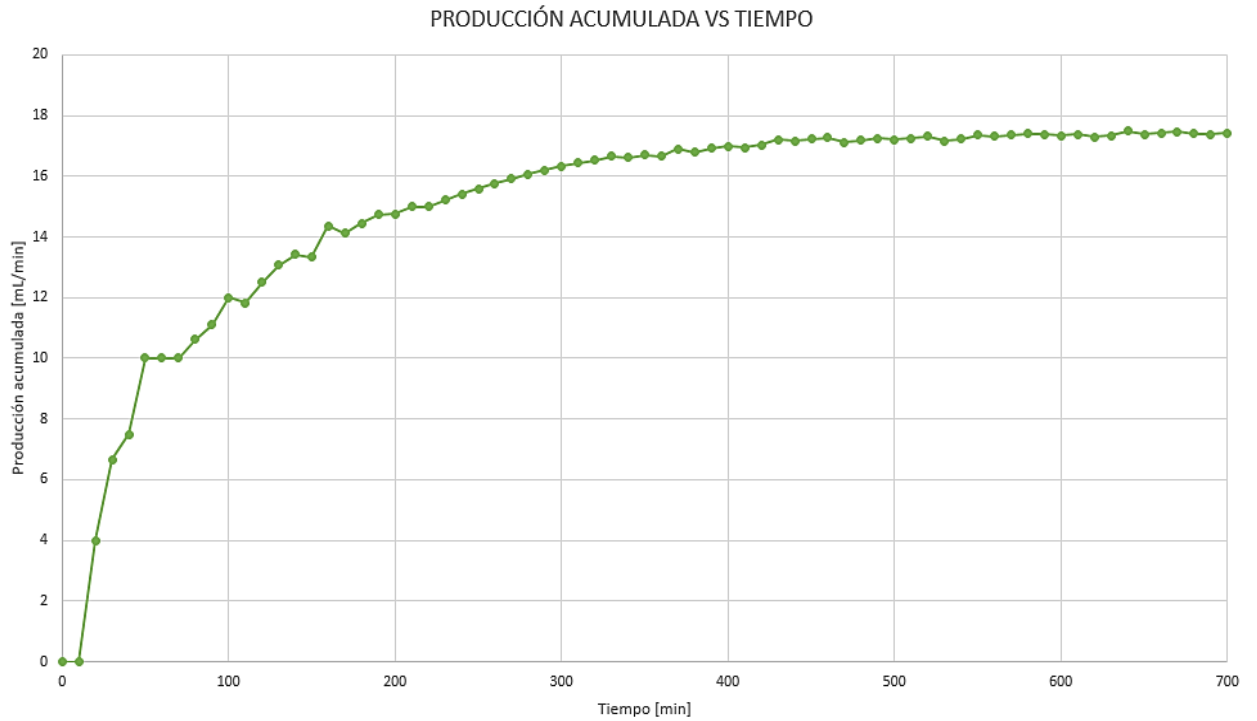


Figura 54. Nivel absoluto del agua residual en la prueba continua.

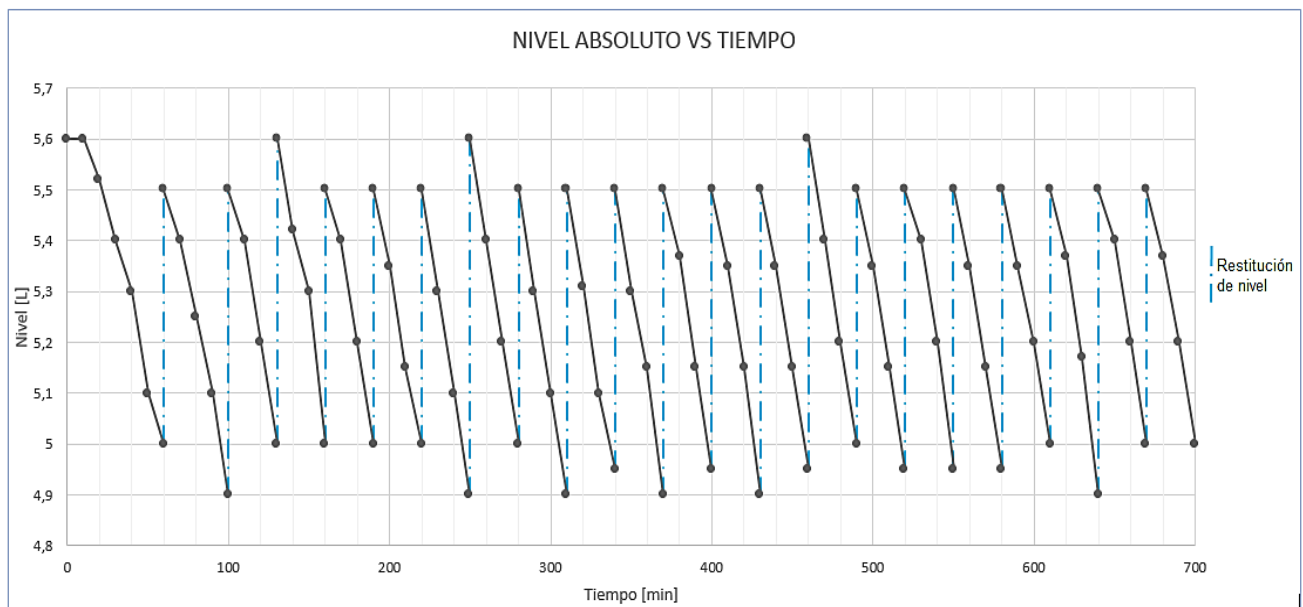
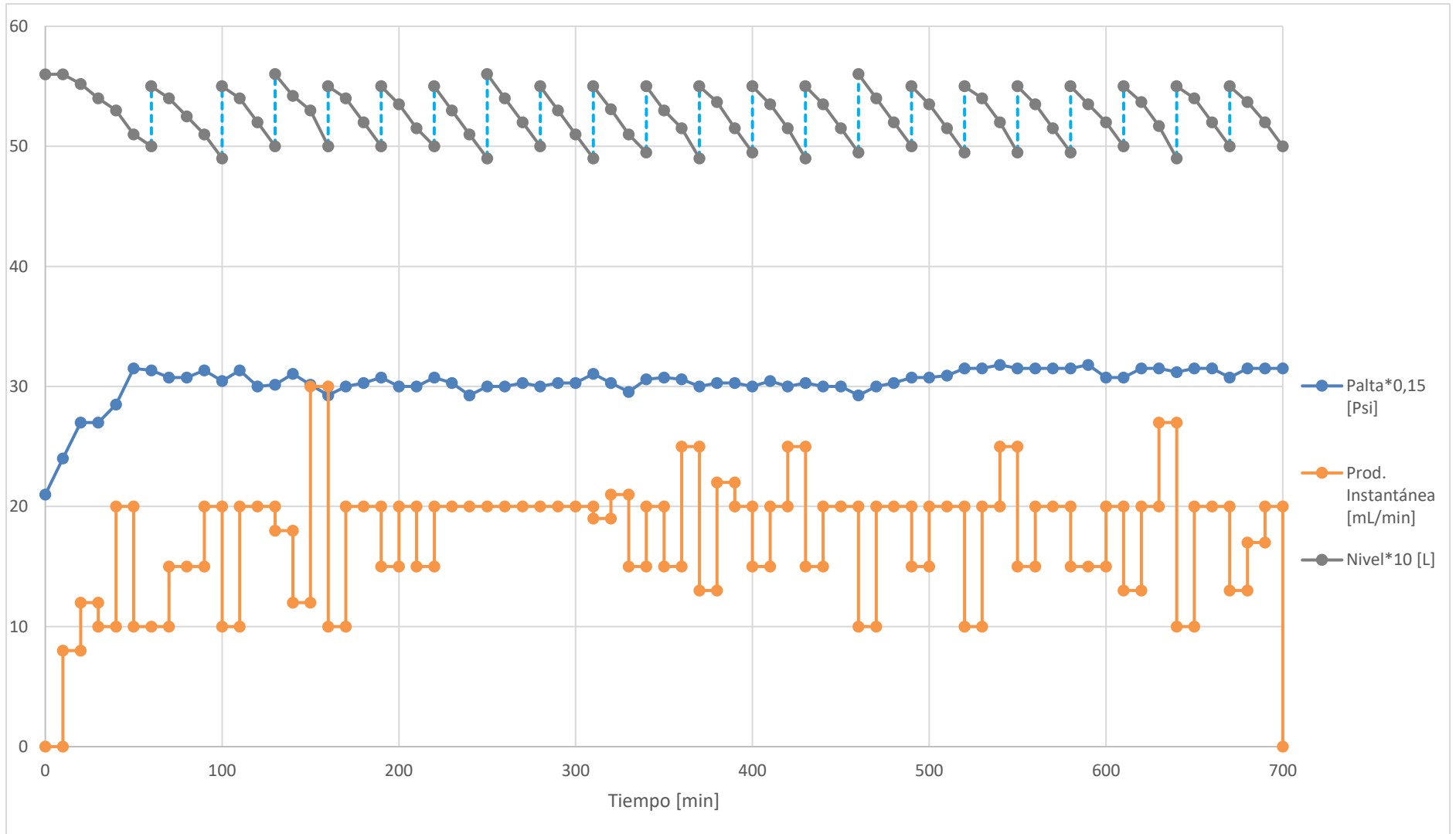


Figura 55. Comparación.



Realizando una comparación del efecto de los parámetros bajo el efecto de condensado por un tiempo de 270 min se observa en la tabla 15 los resultados. En la prueba 4 se tienen mejores resultados en comparación con la prueba 1 debido a que se realiza la restitución de agua con mayor frecuencia manteniendo así el área efectiva. También se observa en la prueba 5, que al disminuir el tiempo del periodo transitorio debido a que la temperatura ingresa a mayor temperatura, el condensado mejora.

Tabla 15. Efecto de la variación de los parámetros que determinan el flujo de calor en el condensado final de cada prueba.

Prueba	Tipo de agua	Condensado	Disminución de la producción respecto a P5.
P1. Disminución del nivel de agua.	Potable	3 litros	30%
P2. Disminución de la presión de vacío.	Potable	1.22 litros	71%
P3. Disminución de la presión de condensación.	Potable	1.84 litros	57%
P4. Variación de los parámetros a 23°C.	Avícola	3.45 litros	20%
P5. Variación de los parámetros a 41°C.	Avícola	4.3 litros	0%

9.2.3. Prueba de concentración de sólidos. Para conocer la concentración de sólidos del agua a tratar, se va a poner en funcionamiento el equipo hasta que este no produzca más vapor y se extraerá el concentrado. Se tienen 9 litros de agua residual avícola, por lo que primero se pondrá a funcionar el equipo con 5,5 litros y luego con 4,5 litros de agua residual. Cuando el equipo dejó de producir vapor, se extrajo el concentrado, pero se observó que este no salió suficientemente saturado de sólidos, por lo que se decidió seguir evaporando el agua concentrada hasta que quedaran solamente sólidos, esto se realizó en una estufa convencional y se obtuvieron los siguientes resultados:

Para una cantidad de 9 litros de agua residual avícola se obtiene una concentración de sólidos de 57 gramos, los resultados se muestran en la figura 56.

Figura 56. Concentración de sólidos.



9.3. PRUEBAS DE ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO

El agua residual avícola se sometió a análisis de laboratorio con el fin de conocer las características fisicoquímicas del agua residual a la entrada y salida (tratada) del sistema. También para comprobar si cumple con los parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles para el vertimiento de aguas de la industria avícola establecidos por la resolución 0631 de 2015 que se encuentra en el anexo A.

Figura 57. Antes y después del tratamiento.



Se observa que, en todos los parámetros el agua tratada se encuentra muy por debajo de los límites máximos establecidos, por lo que es apta para el vertimiento del agua.

Tabla 16. Comparación de los resultados del análisis de laboratorio con la normativa para el vertimiento.

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERIA DE AVES DE CORRAL (BENEFICIO)	Agua a la entrada al sistema	Agua tratada (Condensado)	% de remoción
Generales					
Ph	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6.45	7.19	
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	650,00	2732.7	95.6	96.5%
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅)	mg/L O ₂	300,00	1750	60	96.6%
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100,00	1432	56	96.1%
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	2,00	7.5	<0.1	>98.7%
Grasas y aceites	mg/L	40,00	5.83	<2.6	>55.4
Compuesto de fósforo					
Ortofosfatos (P-PO₄³⁻)	mg/L	Análisis y reporte	32.7	<0.3	>99.1
Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte	13.06	0.28	97.9
Compuesto de nitrógeno					
Nitratos (N-NO₃⁻)	mg/L	Análisis y reporte	4.0	0.4	90.0
Nitritos (N-NO₂⁻)	mg/L	Análisis y reporte	<0.02	<0.02	

Nitrógeno amoniacal (N-NH₃)	mg/L	Análisis y reporte	9.94	4.63	53.4
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte	182.47	37.43	79.5
Iones					
Cloruros (Cl)	mg/L	250,00	151.13	4.97	96.7
Sulfatos (SO₄²⁻)	mg/L	250,00	185.47	4.85	97.4
Otros parámetros para análisis y reporte					
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	76.03	41.28	45.7
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	358.58	75.81	78.9
Dureza cálcica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	65	110	
Dureza total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	190	150	
Color	UPC	Análisis y reporte	2465	1	

10.COSTOS

El costo total de un equipo se establece teniendo en cuenta los costos de capital que corresponden al costo de la inversión inicial para la compra o fabricación del equipo; costos de mantenimiento referentes a una inversión que se debe realizar periódicamente para el buen funcionamiento del equipo; costos de energía referentes al consumo de energía del equipo o cada uno de sus componentes en el periodo de tiempo de trabajo y el costo de depreciación del equipo con el paso de los años en los estados contables. Los anteriores costos son analizados y proyectados para determinar la recuperación del costo pero al tener presente que la ganancia del equipo de evaporación al vacío no representará un ingreso tangible en caso de ser adquirido por una empresa ya que no se comercializara el agua tratada o se reutilizara sino que conlleva una inversión por parte de la empresa con la finalidad de cumplir la normativa establecida por el ministerio del medio ambiente para el cuidado del medio ambiente por medio del vertimiento de los efluentes de la empresa, debido a esto solo se analiza el costo energético y se establece el costo de construcción del prototipo según la capacidad establecida (1 lt/h).

10.1. COSTO DE FABRICACIÓN

Los costos de fabricación del prototipo se establecen en la tabla 17. Los costos de fabricación se ajustan al monto autorizado en el rubro de compra de equipos del proyecto 2350 enmarcado en la VIE.

Tabla 17. Costos de fabricación del sistema de evaporación al vacío con bomba de calor.

COMPONENTE	PRECIO (\$)
Intercambiadores de casco y tubos, estructura de soporte y servicios técnicos de acoplamiento.	15.400.000.00
Componentes de la bomba de calor	3.100.000.00
Costo Total	18.500.000.00

10.2. COSTO DE OPERACIÓN.

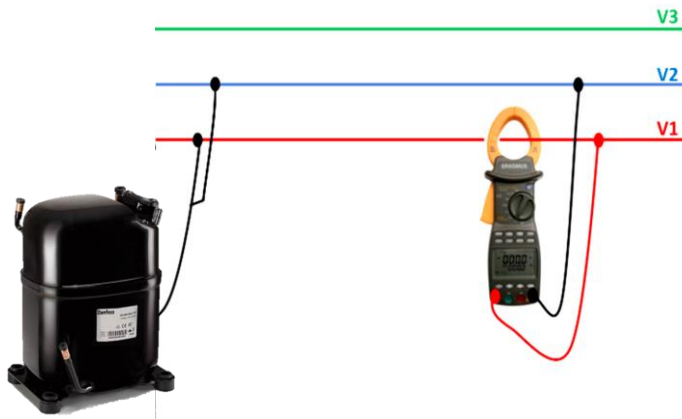
Para determinar el costo de operación del sistema, se realizó toma de datos cada 10 minutos de los valores correspondientes a la corriente, la tensión y el factor de potencia utilizando como herramienta de medición la pinza digital de energía trifásica, ERASMUS; como se muestra en la figura 58 y el ANEXO F, los cuales se promedian al terminar el periodo de prueba para obtener el valor promedio y realizar el cálculo de potencia consumida.

$$P_{activa} = V[\text{voltios}] * I[\text{Amperios}] * \cos \varphi \quad (38)$$

$$P = 219.4 * 5.5 * 0.88$$

$$P = 1053.4 \text{ w} = 1.05 \text{ Kw}$$

Figura 58. Puntos de medición de los factores que definen la potencia eléctrica.



El costo de la energía eléctrica por Kwh establecido en la ciudad de Bucaramanga por la electrificadora de Santander (ESSA) en el sector industrial con un nivel de medida 4 es 389.8962 [\$/Kwh], los costos de operación se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Costo de operación del equipo por periodos de tiempo.

Periodo de tiempo	Costo de operación [pesos]
1 hora	410.7
Diario (24 horas)	9857.5
Mensual (30 días)	295,724.6
Anual (12 meses)	3548,695.7

10.3. RELACIÓN BENEFICIO/COSTO

Para determinar la relación beneficio costo se debe establecer cuál será el beneficio del equipo y el costo de obtener ese beneficio; también se debe tener presente si el beneficio será tangible o intangible puesto que cuando el beneficio es tangible se debe hacer un análisis por medio de la tasa de retorno, pero al ser un beneficio intangible se realiza teniendo en cuenta el parámetro de funcionamiento del equipo, en este caso, el líquido condensado. Teniendo en cuenta lo anterior se establece el beneficio como la cantidad de agua condensada respecto al tiempo y el costo como el consumo energético en el mismo periodo de tiempo, es decir:

$$\frac{C}{B} = \frac{\text{costo de la energía consumida en el mismo periodo de tiempo}}{\text{liquido condensado en periodo de tiempo}} \quad (39)$$

$$\frac{C}{B} = 410.7 \left[\frac{\text{pesos}}{\text{litro}} \right]$$

En este caso la relación beneficio costo está definida por el valor de producir un litro de agua limpia en un periodo de tiempo, ya que al ser esta una utilidad intangible, el punto de comparación sería el costo de obtener un litro de agua limpia que no se recuperará puesto que la finalidad es cumplir con lo establecido en la resolución 0631 del ministerio del medio ambiente.

10.4. FACTOR DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA DE CALOR

La eficiencia de una bomba de calor se mide por su factor de funcionamiento (F_{BC}) y así mismo por el coeficiente de rendimiento (COP). Para una correcta eficiencia y funcionalidad, una bomba de calor debe alcanzar un COP de entre 2 y 6, dependiendo de la diferencia entre las temperaturas de ambos focos.

Para determinar el COP de la bomba de calor se tiene en cuenta la variación de la producción de vapor para determinar de igual forma la variación de este término como se muestra en la figura 59. El valor promedio del COP es 2.4, definido para una producción constante de vapor.

Puesto que la eficiencia energética es función de las temperaturas de condensación y evaporación, es decir de las condiciones exteriores al sistema de refrigeración, en este caso la temperatura de saturación del agua, se muestra la variación del COP y las presiones del sistema de refrigeración en la figura 60.

Figura 59. Variación del COP y el Ff_{BC}

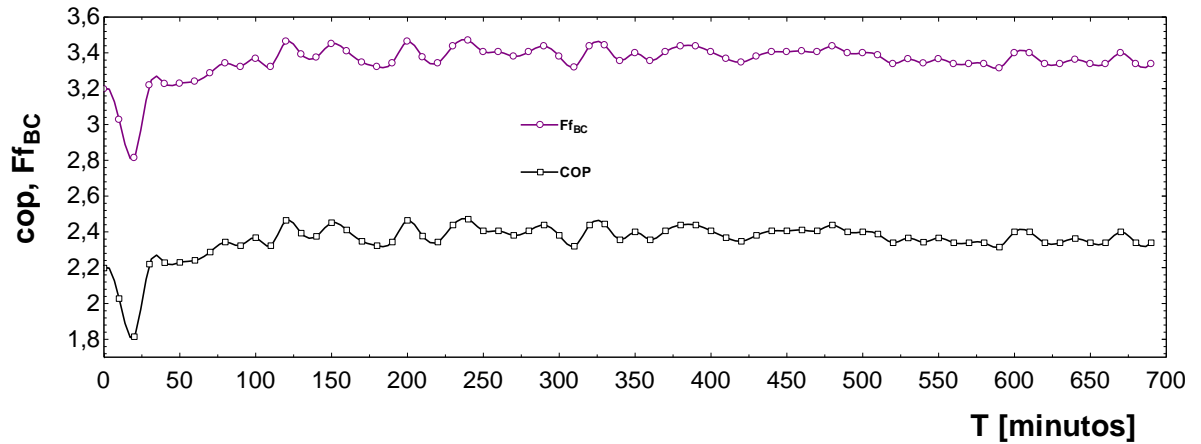
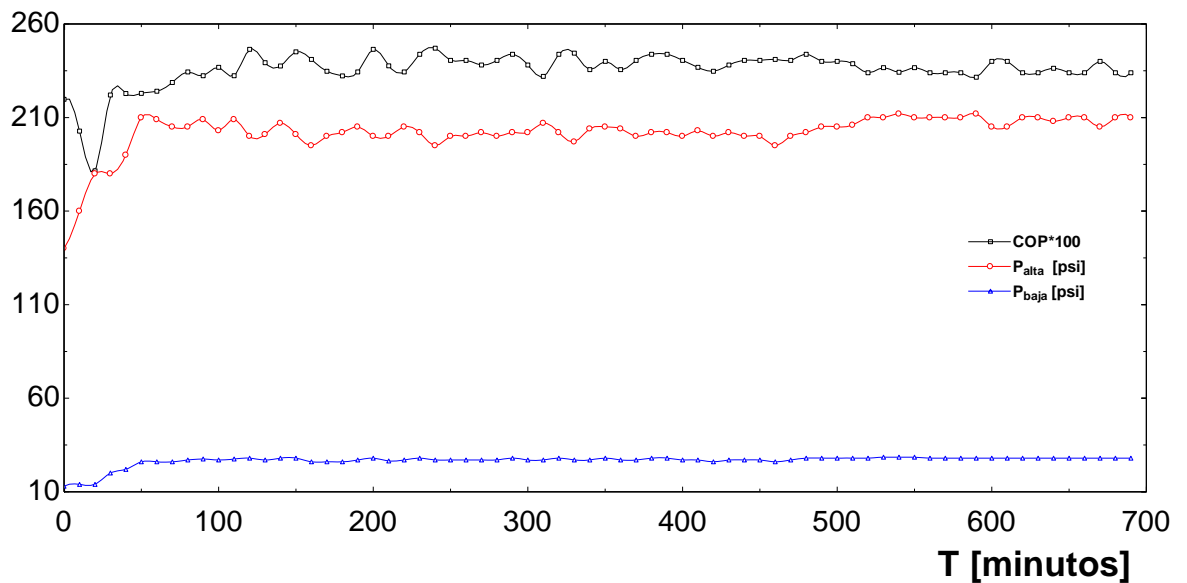


Figura 60. Variación del COP y las presiones de la bomba de calor.



11. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas. La evaporación al vacío tiene la ventaja de que se requiere una temperatura de evaporación relativamente baja respecto a la requerida para ebullición a presión atmosférica, es decir a 100°C. Esto permitió utilizar el calor que se rechaza en el condensador de una bomba de calor como fuente de energía para la evaporación del agua.

Se identificaron los factores más influyentes para optimizar la velocidad de producción de condensado. Se produjo una disminución en la producción de condensado útil del 71% cuando se disminuyó en 4 in Hg el nivel de vacío (con respecto al nivel óptimo de 25 in Hg) en el conjunto evaporador-condensador de agua. Se produjo una disminución en la producción de condensado útil del 57% cuando se disminuyó 70 psi la presión de condensación del refrigerante (con respecto a la presión de referencia de 220 psi). Se produjo una disminución en la producción de condensado útil del 30% cuando se disminuyó 3 litros el nivel del agua (con respecto al nivel óptimo de 5,5 litros) en el conjunto evaporador-condensador de agua. Se deduce que el factor más influyente es la presión de vacío.

Se encontró una correspondencia entre el área de transferencia requerida para la evaporación calculada mediante análisis teóricos con relación al área real utilizada en las pruebas experimentales. El área calculada teóricamente equivale a una longitud efectiva de 57 cm y en las pruebas para hallar el nivel óptimo fue de 28 cm.

La calidad del agua obtenida mediante análisis fisicoquímico realizado al agua avícola a tratar y al agua producida. Muestran que los valores de calidad del agua tratada cumplen con los valores límites máximos permisibles (VLMP) para el vertimiento de aguas al alcantarillado establecidos por la resolución 0631 de 2015 para la industria avícola.

Parámetro	Entrada del agua	Salida del agua	Norma 0631
DQO [mgO ₂ /L]	2732,7	95,6	650
DBO [mgO ₂ /L]	1750	60	300
Grasas y aceites [mg/L]	5,83	< 2,6	40
Cloruros [mgCl/L]	151,13	4,97	250

El costo de operación del prototipo construido para condensar 1 litro de agua en una hora se calculó teniendo en cuenta solo el aspecto energético resulto ser de 410,7 pesos. Este valor es superior al obtenido por otros métodos de tratamiento de aguas residuales como por agentes químicos, por compresión de vapor, etc. No se hace un análisis basado en la recuperación de capital debido a que el beneficio del prototipo es de tipo ambiental y no económico.

El sistema de evaporación al vacío presenta bajo costo de mantenimiento, los costos se asocian principalmente con la limpieza interior de los intercambiadores de evaporación y de condensación, la frecuencia de la misma depende de los contaminantes más frecuentes que tengan las aguas residuales a tratar y la cantidad que se trate de esta.

12. RECOMENDACIONES

Para realizar una depuración más efectiva y obtener un condensado más limpio se recomienda realizar un tratamiento previo al agua residual con el fin de remover materiales sólidos de gran tamaño (mayores a 0,5 mm) por medio de filtros, tamices, rejillas, etc. Con esto se garantiza que la acumulación de dichos sólidos en el evaporador no afecte la transferencia de calor al formarse rápidamente costras de suciedad alrededor de los tubos y prevenir que se obstruya la tubería de suministro y descarga del agua a tratar.

Para evitar el arrastre de líquido se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- Que el condensador este por encima del evaporador así las gotas se devuelven por gravedad.
- Que dentro del evaporador haya una altura mayor a 20 cm entre el nivel máximo del agua y la tubería de vapor.
- No sobrepasar el nivel efectivo del agua (en este caso 5,5 litros).
- Que la velocidad en la tubería de vapor no sea mayor a 3 mm/s, es decir, a diámetros de tubería mayores a 1 pulgada.
- Colocar un separador de gotas para garantizar con mayor seguridad que no se transporte agua contaminada entre las cámaras.

Para la construcción del sistema se recomienda que los materiales a utilizar en los componentes sean de acero inoxidable o algún material que no se desgaste u oxide, debido a que los fluidos a tratar son altamente corrosivos y esto evita que el condensado se contamine.

Hacer investigaciones para determinar cuántas veces el agua reutilizada en algún proceso puede ser tratada.

Medir el vacío independiente en cada uno de los intercambiadores, ubicando un vacuómetro en la línea de vapor o en la línea de suministro de agua.

Hacer un control sencillo, un control PID o buscar un sensor que, al conocer la presión o temperatura de la línea de alta en la bomba de calor, regule la velocidad del ventilador en el condensador auxiliar así se mantiene el subenfriamiento y la presión de alta constante, evitando daños en el compresor por sobrepresión.

Para evitar colocar el condensador auxiliar en el sistema de refrigeración, se puede pasar la línea de refrigerante por el tanque de entrada (llenado) como un serpentín, de esta manera el agua que entra al sistema entra precalentada disminuyendo el tiempo en el estado transitorio.

Hacer un estudio del efecto de la presión del condensador de refrigerante (alta) con respecto a la velocidad de producción de condensado. Donde la primera prueba comience en la presión nominal (210 psi) y se mantenga constante durante el tiempo de la prueba y al final definir cuanto condensado se obtuvo. Las siguientes pruebas se harán de igual forma, pero disminuyendo cada vez 10 psi. Después se haría la comparación de cada una de las pruebas para observar el nivel óptimo de operación de dicha presión.

BIBLIOGRAFÍA

ALIANZA POR EL AGUA. Estanque de aireación. [En línea]. Compendio de sistemas y tecnologías de saneamiento. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <http://alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t4.html>

ARANDA, Christian. Tratamiento biológico de aguas residuales. [En línea]. Tratamiento biológico de aguas residuales. 2013. (Recuperado el 10 septiembre 2018). Disponible en: <http://israeltratamientobiologico.blogspot.com/>

ARNABAT, Idoia. Aire acondicionado con bomba de calor reversible. [En línea]. 2017. (Recuperado el 3 febrero 2019). Disponible en: <https://bit.ly/2GE59f4>

BARCAMP. El proceso de fangos activados. [En línea]. Química medioambiental. 2014. (Recuperado el 10 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2BYfoab>

BOSSTECH. Tratamiento de agua por intercambio iónico. [En línea]. 2018. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2E9mJUi>

CALOR Y FRIO. Coeficientes de rendimiento (COP) y eficiencia energética en el ciclo de refrigeración (EER) de la bomba de calor. [En línea]. 2015. (Recuperado el 3 febrero 2019). Disponible en: <https://bit.ly/2Vg2V8R>

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO DEL AGUA (CIDTA). Capítulo: Desbaste. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible: <https://bit.ly/2GUIU3A>

CIDTA. Capítulo: Trituradores. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible: <https://bit.ly/2GXKkKH>

CIDTA. Conceptos: sedimentación. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2H1vboG>

CBM. Depuración de aguas residuales. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2twHlG9>

CLIMONT. Calcular COP de un aire acondicionado. [En línea]. (Recuperado el 3 febrero 2019). Disponible en: <https://bit.ly/2Eqf1a0>

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 1594 (26, junio, 1984). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos. Ministerio de agricultura. Bogotá, D.C., 1984.

COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 0631 (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Diario oficial. Bogotá, D.C., 2015, no. 49486. p. 10.

CONDORCHEM ENVITECH. Evaporación al vacío mediante bomba de calor. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2U2ovxv>

CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

CONDORCHEM ENVITECH. Tratamiento de aguas residuales industriales mediante evaporación al vacío. [En línea]. (Recuperado el 15 agosto 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2XgQvzc>

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS POR NITRATOS. Tratamiento de aguas residuales. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: http://members.tripod.com/london_job/trabajoseninglaterra/id29.html

CORPORACION AUTÓNOMA REGIONAL PARA LA DEFENSA DE LA MESETA DE BUCARAMANGA. Informe de calidad ambiental, 2013. p. 151.

DE LA CRUZ, Renzo. Tratamiento anaerobio. [En línea]. Monografías. (Recuperado el 10 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2BNQ3j0>

FEDERACION NACIONAL DE AVICULTORES DE COLOMBIA Y MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Guía ambiental para el subsector avícola. Bogotá. 2014. Pag 8.

FIBRAS Y NORMAS DE COLOMBIA S.A.S. Osmosis inversa. [En línea]. 2018. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2U3TKrl>

FISICOQUÍMICA. Temperatura adsorción. [En línea]. 2015. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2TdBaA0>

FLUENCE. Agua salobre como un recurso. [En línea]. 2017. (Recuperado el 03 octubre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2XbqVM2>

H2O SOLUCIONES. Equipos de ultrafiltración. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2r5Pfd>

ICQUBB. Transferencia de sólidos en el tratamiento del agua. [En línea]. Depuración del agua. 2016. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2EpoYEn>

MWRA. The Clinton Wastewater Treatment Plant. [En línea]. 2010. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2BJcl5d>

OCHOA, Danny. Introducción al tratamiento de aguas residuales. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2STfyde>

PECOMARK. Condensador aire AT-16N. [En línea]. (Recuperado el 16 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2T7QsGV>

PURIFICACIÓN DEL AGUA. Purificación del agua. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <http://purificaciondelagua.16mb.com/>

RAMIREZ, F. Cloración. [En línea]. El agua potable. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <http://www.elaguapotable.com/cloracion1.htm>

RAMIREZ, F. Tratamiento de lodos. [En línea]. El agua potable. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2TanPZr>

SANDOVAL; C. Problema global. Incremento Urbano, aguas residuales y la flora. CUDE. CEJUS. 2008.

SPENA GROUP. Tratamiento primario del agua y aguas residuales – sistemas de coagulación y floculación. [En línea]. (Recuperado el 26 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2SsNygs>

STOECKER, W. F. Refrigeración y acondicionamiento de aire. Madrid: ediciones castilla S.A., 1965. Pp. [38-55; 75-178; 15-243]

TECNOLOGIA, Acqua. Coagulantes y floculantes. [En línea]. Acqua tecnología, Ingeniería en tratamiento de agua y procesos. 2018. (Recuperado el 20 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2SSPnTZ>

TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. Métodos o tipos de tratamiento de aguas residuales. [En línea]. 2014. (Recuperado el 10 septiembre 2018). Disponible en: <https://tratamientodeaguasresiduales.net/tipos/>

TU AIRE ACONDICIONADO. Los gases refrigerantes: clasificación. [En línea]. (recuperado el 6 septiembre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2tySj9p>

VERAS, M. Las aguas residuales. [En línea] Alternativas para cuidar el medio ambiente. 2015. (Recuperado el 21 abril 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2T77TYe>

YÁÑEZ, Gildardo. Asignación de colores para cilindros de gas refrigerante. [En línea]. Mundo HVAC&R. 2010. (Recuperado el 03 octubre 2018). Disponible en: <https://bit.ly/2VeMLfI>

ANEXOS

ANEXO A. NORMATIVA COLOMBIANA ACERCA DE LOS VERTIMIENTOS

Ministerio de Agricultura

DECRETO 1594 DEL 26 DE JUNIO DE 1984

Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II y el Título III de la Parte III -Libro I- del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos.

EL PRESIDENTE DE LA REPUBLICA DE COLOMBIA,
en uso de las atribuciones que le confiere el numeral 3 del artículo 120 de la Constitución política,

DECRETA:

CAPITULO I DEFINICIONES

Artículo 1: Cuando quiera que el presente Decreto se refiera a recurso, se entenderá por tal las aguas superficiales, subterráneas, marinas y estuarinas, incluidas las aguas servidas.

Artículo 2: La sigla EMAR utilizada en el presente Decreto, corresponde a entidad encargada del manejo y administración del recurso.

Artículo 3: Entiéndese por entidad encargada del manejo y administración del recurso (EMAR), aquella que tenga asignadas esas funciones por la ley o por delegación, como el INDERENA, el HIMAT en los distritos de riego, las Corporaciones Autónomas Regionales de Desarrollo y la Dirección Marítima y Portuaria, DIMAR.

Artículo 4: Los criterios de calidad establecidos en el presente Decreto son guías para ser utilizados como base de decisión en el ordenamiento, asignación de usos al recurso y determinación de las características del agua para cada uso.

Artículo 5: Entiéndese por tratamiento convencional para potabilizar las aguas, los siguientes procesos y operaciones: coagulación, floculación, sedimentación, filtración y desinfección.

Artículo 6: Entiéndese por vertimiento líquido cualquier descarga líquida hecha a un cuerpo de agua o a un alcantarillado.

Artículo 7: Es usuario toda persona natural o jurídica de derecho público o privado, que utilice agua tomada directamente del recurso o de un acueducto, o cuya actividad pueda producir vertimiento directo o indirecto al recurso.

Artículo 8: Entiéndese por usuario nuevo aquel cuya actividad se inicie después de la fecha de entrada en vigencia del presente Decreto.

Artículo 9: Entiéndese por usuario existente aquel cuya actividad ha venido realizándose con anterioridad a la fecha de entrada en vigencia del presente Decreto.

Artículo 10: Entiéndese por zona de mezcla, el área técnicamente determinada a partir del sitio de vertimiento, indispensable para que se produzca mezcla homogénea de este con el cuerpo receptor; en la zona de mezcla se permite sobrepasar los criterios de calidad de agua para el uso asignado, siempre y cuando se cumplan las normas de vertimiento.

Artículo 11: Denomínase vertimiento no puntual aquel en el cual no se puede precisar el punto exacto de descarga al recurso, tal es el caso de vertimientos provenientes de escorrentía, aplicación de agroquímicos u otros similares.

Artículo 12: Denomínase lodo a la suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares.

Artículo 13: Denomínase concentración de una sustancia, elemento o compuesto en un líquido, la relación existente entre su peso y el volumen del líquido que lo contiene.

Artículo 14: Denomínase carga al producto de la concentración promedio por el caudal promedio determinado en el mismo sitio; se expresa en kilogramos por día (Kg/d).

Artículo 15: Denomínase bioensayo acuático al procedimiento por el cual las respuestas de organismos acuáticos se usan para detectar o medir la presencia o efectos de una o más sustancias, elementos, compuestos, desechos o factores ambientales solos o en combinación.

Artículo 16: Denomínase toxicidad la propiedad que tiene una sustancia, elemento o compuesto, de causar daños en la salud humana o la muerte de un organismo vivo.

Artículo 17: Denomínase toxicidad aguda la propiedad de una sustancia, elemento, compuesto, desecho, o factor ambiental, de causar efecto letal u otro efecto nocivo en cuatro (4) días o menos a los organismos utilizados para el bioensayo acuático.

Artículo 18: Denomínase toxicidad crónica la propiedad de una sustancia, elemento, compuesto, desecho o factor ambiental, de causar cambios en el apetito, crecimiento, metabolismo, reproducción, movilidad o la muerte o producir mutaciones después de cuatro (4) días a los organismos utilizados por el bioensayo acuático.

Artículo 19: Denomínase CL9650 a la concentración de una sustancia, elemento o compuesto, solos o en combinación, que produce la muerte al cincuenta por ciento (50%) de los organismos sometidos a bioensayos en un período de noventa y seis (96) horas.

Artículo 20: Considéranse sustancias de interés sanitario las siguientes:

Parágrafo: El Ministerio de Salud podrá considerar como de interés sanitario sustancias diferentes a las relacionadas en el presente artículo.

Artículo 21: Entiéndese por usuario de interés sanitario aquel cuyos vertimientos contengan las sustancias señaladas en el artículo anterior.

CAPITULO VI

DEL VERTIMIENTO DE LOS RESIDUOS LIQUIDOS

Artículo 60: Se prohíbe todo vertimiento de residuos líquidos a las calles, calzadas y canales o sistemas de alcantarillado para aguas lluvias, cuando quiera que existan en forma separada o tengan esta única destinación.

Artículo 61: Se prohíbe la inyección de residuos líquidos a un acuífero, salvo que se trate de la

reinyección de las aguas provenientes de la exploración y explotación petrolífera y de gas natural, siempre y cuando no se impida el uso actual o potencial del acuífero.

Artículo 62: Se prohíbe la utilización de aguas del recurso, del acueducto público o privado y las de almacenamiento de aguas lluvias, con el propósito de diluir los vertimientos, con anterioridad a la descarga al cuerpo receptor.

Artículo 63: Se permite la infiltración de residuos líquidos siempre y cuando no se afecte la calidad del agua del acuífero en condiciones tales que impida los usos actuales o potenciales.

Artículo 64: Cuando en el presente Decreto se haga referencia a normas de vertimiento, se entenderá por tales las contenidas en este Capítulo con las modificaciones o adiciones que el Ministerio de Salud o la EMAR, establezcan de acuerdo con los procedimientos señalados en el Capítulo XI de este Decreto.

Artículo 65: Declarado nulo por el Consejo de Estado en Sentencia del 14 de agosto de 1992. Con fundamento en las disposiciones de este Decreto y las demás vigentes sobre la materia, la EMAR fijará en cada caso las normas que deben cumplir los vertimientos a un cuerpo de agua o a un alcantarillado, previamente a la instalación, modificación, ampliación de una fuente contaminante, o desarrollo de un plan de cumplimiento por parte de cualquier usuario. Cuando se trate de normas específicas de vertimiento para protección de los recursos naturales, estas deberán ser fijadas por la EMAR.

Artículo 66: Las normas de vertimiento serán fijadas teniendo en cuenta los criterios de calidad establecidos para el uso o los usos asignados al recurso.

En los tramos en donde se asignen usos múltiples, las normas de vertimiento se establecerán teniendo en cuenta los valores más restrictivos de cada uno de los parámetros fijados para cada uso.

El control de los criterios de calidad se hará por fuera de la zona de mezcla, la cual será determinada para cada situación específica por la EMAR.

Artículo 67: Para el control del cumplimiento de las normas de vertimiento por parte de cada usuario, se deberá tener en cuenta que cuando la captación y la descarga se realicen en un mismo cuerpo de agua, en las mediciones se descontarán las cargas de los contaminantes existentes en el punto de captación.

Artículo 68: Los usuarios existentes que amplíen su producción, serán considerados como usuarios nuevos con respecto al control de los vertimientos que correspondan al grado de ampliación.

Artículo 69: Los responsables de todo sistema de alcantarillado deberán dar cumplimiento a las normas de vertimiento contenidas en el presente Decreto.

Artículo 70: Los sedimentos, lodos y sustancias sólidos provenientes de sistemas de tratamiento de agua o equipos de control de contaminación ambiental, y otras tales como cenizas, cachaza y bagazo, no podrán disponerse en cuerpos de aguas superficiales, subterráneas, marinas, estuarinas o sistemas de alcantarillado, y para su disposición deberá cumplirse con las normas legales en materia de residuos sólidos.

Artículo 71: Para efectos del control de la contaminación del agua por la aplicación de agroquímicos, se tendrá en cuenta:

- a. Se prohíbe la aplicación manual de agroquímicos dentro de una franja de tres (3) metros, medida desde las orillas de todo cuerpo de agua.
- b. Se prohíbe la aplicación aérea de agroquímicos dentro de una franja de treinta (30) metros, medida desde las orillas de todo cuerpo de agua.
- c. La aplicación de agroquímicos en cultivos que requieran áreas anegadas artificialmente requerirá concepto previo del Ministerio de Salud o de su entidad delegada y de la EMAR.
- d. Además de las normas contenidas en el presente artículo sobre aplicación de agroquímicos, se deberán tener en cuenta las demás disposiciones legales y reglamentarias sobre la materia.

DE LAS NORMAS DE VERTIMIENTO

Artículo 72: Todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas:

Referencia Usuario Existente Usuario Nuevo

pH 5 a 9 unidades 5 a 9 unidades

Temperatura < 40°C < 40°C

Material flotante Ausente

Ausente

Grasas y aceites Remoción > 80% en carga Remoción > 80% en carga

Sólidos suspendidos,

domésticos o industriales Remoción > 50% en carga Remoción > 80% en carga

Demanda bioquímica de oxígeno:

Para desechos domésticos Remoción > 30% en carga Remoción > 80% en carga

Para desechos industriales Remoción > 20% en carga Remoción > 80% en carga

Carga máxima permisible (CMP), de acuerdo con lo establecido en los artículos 74 y 75 del presente Decreto.

Parágrafo: Declarado nulo por el Consejo de Estado en Sentencia del 14 de agosto de 1992. De acuerdo con las características del cuerpo receptor y del vertimiento, la EMAR decidirá cuál o cuáles de las normas de control de vertimiento señaladas en este artículo podrán excluirse.

Artículo 73: Todo vertimiento a un alcantarillado público deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas:

Referencia Valor

pH 5 a 9 unidades

Temperatura < 40°C

Ácidos, bases o soluciones ácidas o básicas que puedan causar contaminación; sustancias explosivas o inflamables. Ausentes
Sólidos sedimentables < 10 ml/l
Sustancias solubles en hexano < 100 mg/l

Referencia Usuario Existente Usuario

Nuevo Sólidos suspendidos para desechos domésticos e industriales Remoción > 50% en carga Remoción > 80% en carga

Demanda bioquímica de oxígeno:

Para desechos domésticos Remoción > 30% en carga Remoción > 80% en carga
Para desechos industriales Remoción > 20% en carga Remoción > 80% en carga
Caudal máximo 1.5 veces el caudal promedio horario

Carga máxima permisible (CMP) de acuerdo a lo establecido en los artículos 74 y 75 del presente Decreto.

Parágrafo: Declarado nulo por el Consejo de Estado en Sentencia del 14 de agosto de 1992. De acuerdo con las características del cuerpo receptor y del vertimiento, la EMAR decidirá cuál o cuáles de las normas de control de vertimiento anotadas, podrán excluirse.

Artículo 74: Las concentraciones para el control de la carga de las siguientes sustancias de interés sanitario, son:

Sustancia Expresada como Concentración

(mg/l) Arsénico As 0.5
Bario Ba 5.0
Cadmio Cd 0.1
Cobre Cu 3.0
Cromo Cr+6 0.5
Compuestos fenólicos Fenol 0.2
Mercurio Hg 0.02
Níquel Ni 2.0
Plata Ag 0.5
Plomo Pb 0.5
Selenio Se 0.5
Cianuro CN 1.0
Difenil policlorados Concentración de agente activo No detectable
Mercurio orgánico Hg No detectable
Tricloroetileno Tricloroetileno 1.0
Cloroformo Extracto Carbón
Cloroformo (ECC) 1.0
Tetracloruro de carbono Tetracloruro de

Carbono 1.0
Dicloroetileno Dicloroetileno 1.0
Sulfuro de carbono Sulfuro de carbono 1.0
Otros compuestos organoclorados, Concentración de cada variedad agente activo 0.05
Compuestos organofosforados, Concentración de cada variedad agente activo 0.1
Carbamatos 0.1

Parágrafo: Cuando los usuarios, aún cumpliendo con las normas de vertimiento, produzcan concentraciones en el cuerpo receptor que excedan los criterios de calidad para el uso o usos asignados al recurso, el Ministerio de Salud o las EMAR podrán exigirles valores más restrictivos en el vertimiento.

Artículo 75: La carga de control de un vertimiento que contenga las sustancias de que trata el artículo anterior, se calculará mediante la aplicación de las siguientes ecuaciones:

$$A = (q) (cdc) (0.0864)$$

$$b = (q) (cv) (0.0864)$$

Parágrafo: Para los efectos de las ecuaciones a que se refiere el presente artículo adóptanse las siguientes convenciones:

A: Carga de control, kg/día.

Q: Caudal promedio del vertimiento, l/seg.

B: Carga en el vertimiento, kg/día.

CDC: Concentración de control, mg/l.

CV: Concentración en el vertimiento,

mg/l. 0.0864: Factor de conversión.

Parágrafo 2: La carga máxima permisible (CMP) será el menor de los valores entre A y B.

Artículo 76: Cuando la carga real en el vertimiento sea mayor que la carga máxima permisible (CMP), aquella se deberá reducir en condiciones que no sobrepase la carga máxima permisible.

Artículo 77: Cuando el caudal promedio del vertimiento se reduzca y por consiguiente la concentración de cualesquiera de las sustancias previstas en el artículo 74 se aumente, la carga máxima permisible (CMP) continuará siendo la fijada según el parágrafo 2 del artículo 75 del presente Decreto.

Artículo 78: El control del pH, temperatura (T), material flotante, sólidos sedimentables, caudal y sustancias solubles en hexano, en el vertimiento, se hará con base en unidades y en concentración. El de los sólidos suspendidos y el de la demanda bioquímica de oxígeno con base en la carga máxima permisible (CMP), de acuerdo con las regulaciones que establezca la EMAR.

Artículo 79: Las normas de vertimiento correspondiente a las ampliaciones que hagan los usuarios del recurso se calcularán de acuerdo con lo establecido en los artículos 75, 76, 77 y 78 del presente Decreto.

Artículo 80: El control de vertimientos para las ampliaciones deberá efectuarse simultáneamente con la iniciación de las operaciones de ampliación o modificación.

Artículo 81: Las ampliaciones deberán disponer de sitios adecuados para la caracterización y aforo de sus efluentes.

Artículo 82: De acuerdo con su caracterización, todo vertimiento puntual o no puntual, además de las disposiciones del presente Decreto deberá cumplir con las normas de vertimiento que establezca la EMAR.

Artículo 83: Los usuarios que a la fecha de expedición del presente Decreto estén desarrollando obras conforme a las exigencias de la EMAR respectiva o del Ministerio de Salud, deberán cumplir con las normas de vertimiento establecidas en los plazos convenidos.

Parágrafo: Los usuarios a que hace referencia el presente artículo, una vez expirados los plazos de los permisos o autorizaciones correspondientes, deberán cumplir con las normas contenidas en el presente Decreto o cualesquiera otras que en desarrollo del mismo establezca la EMAR.

Artículo 84: Los residuos líquidos provenientes de usuarios tales como hospitales, lavanderías, laboratorios, clínicas, mataderos, así como los provenientes de preparación y utilización de agroquímicos, garrapaticidas y similares, deberán ser sometidos a tratamiento especial, de acuerdo con las disposiciones del presente Decreto y aquellas que en desarrollo del mismo o con fundamento en la ley establezcan el Ministerio de Salud y la EMAR.

Artículo 85: El Ministerio de Salud y la EMAR establecerán las normas que deberán cumplir los vertimientos de residuos líquidos radiactivos.

Artículo 86: Toda edificación, concentración de edificaciones o desarrollo urbanístico, turístico o industrial fuera del área de cobertura del sistema de alcantarillado público, deberá dotarse de sistemas de recolección y tratamiento de residuos líquidos conforme a las normas especiales que para cada caso señalen el Ministerio de Salud y la EMAR correspondiente.

Artículo 87: Se prohíbe el vertimiento de residuos líquidos no tratados provenientes de embarcaciones, buques, naves u otros medios de transporte marítimo, fluvial o lacustre, en aguas superficiales dulces, marinas y estuarinas.

Parágrafo: La EMAR fijará las normas de vertimiento para el caso contemplado en este artículo teniendo en cuenta lo establecido en el presente Decreto.

Artículo 88: Los puertos deberán contar con un sistema de recolección y manejo para los residuos líquidos provenientes de embarcaciones, buques, naves y otros medios de transporte. Dichos sistemas deberán cumplir con las normas de vertimiento.

Artículo 89: Las disposiciones del presente Decreto también se aplicarán a las exploraciones y explotaciones petroleras o de gas natural, el beneficio del café, los galpones, las porquerizas, los establos y similares.

Artículo 90: En ningún caso se permitirán vertimientos de residuos líquidos que alteren las características existentes en un cuerpo de agua que lo hacen apto para todos los usos señalados en el presente Decreto.

Artículo 91: No se admite ningún tipo de vertimiento:

- a. En las cabeceras de las fuentes de agua.
- b. En un sector aguas arriba de las bocatomas para agua potable, en extensión que determinará, en cada caso, la EMAR conjuntamente con el Ministerio de Salud.
- c. En aquellos cuerpos de agua que la EMAR y el Ministerio de Salud, total o parcialmente declaren especialmente protegidos.

Artículo 92: El Ministerio de Salud o su entidad delegada, así como la EMAR, establecerán el sitio de toma de muestras para la evaluación de las concentraciones de sustancias de interés sanitario en un vertimiento.

Artículo 93: Cuando en un cuerpo de aguas se presenten vertimientos accidentales o por fuerza mayor o caso fortuito, tales como de petróleo, hidrocarburos y otras sustancias, que originen situaciones de emergencia, el Ministerio de Salud coordinará con las EMAR los procedimientos tendientes a controlar dicha situación.

Artículo 94: Se prohíbe el lavado de vehículos de transporte aéreo y terrestre en las orillas y en los cuerpos de agua, así como el de aplicadores manuales y aéreos de agroquímicos y otras sustancias tóxicas y sus envases, recipientes o empaque.

Artículo 95: Se prohíbe el vertimiento de residuos líquidos sin tratar, provenientes del lavado de vehículos aéreos y terrestres, así como el de aplicadores manuales y aéreos, recipientes, empaques y envases que contengan o hayan contenido agroquímicos u otras sustancias tóxicas.

Parágrafo: Los residuos líquidos provenientes de embarcaciones, buques, naves o medios de transporte similares, se dispondrán de conformidad con el artículo 88 de este Decreto.

Artículo 96: Los usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refinan, transformen, procesen, transporten o almacenen hidrocarburos o sustancias nocivas para la salud y para los recursos hidrobiológicos, deberán estar provistos de un plan de contingencia para la prevención y control de derrames, el cual deberán contar con la aprobación de la EMAR y el Ministerio de Salud o de su entidad delegada.

Artículo 97: El Ministerio de Salud o la EMAR podrán prohibir el vertimiento de residuos líquidos que ocasionen altos riesgos para la salud o para los recursos hidrobiológicos, o exigir la ejecución de un programa de control de emergencia.

RESOLUCIÓN 631 DE 2015

(marzo 17)

Diario Oficial No. 49.486 de 18 de abril de 2015

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.

EL MINISTRO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE,

en uso de sus facultades legales y en especial las conferidas por el numeral 25 del artículo 5o de la Ley 99 de 1993 y el artículo 28 del Decreto número 3930 de 2010 modificado por el artículo 1o del Decreto número 4728 de 2010, y

CONSIDERANDO:

Que el artículo 49 de la Constitución Política establece que el saneamiento ambiental es un servicio público a cargo del Estado.

Que los artículos 79 y 80 de la Constitución Política establecen como obligación del Estado, proteger la diversidad e integridad del ambiente; fomentar la educación ambiental; prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental; imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados.

Que de acuerdo con el artículo 28 del Decreto número 3930 de 2010, modificado por el artículo 1o del Decreto número 4728 de 2010, corresponde al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, fijar los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir los vertimientos puntuales a las aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Que el artículo 5o de la Ley 99 de 1993 establece que el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible tiene entre sus funciones, regular las condiciones generales para el saneamiento del medio ambiente y dictar regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir la contaminación hídrica en todo el territorio nacional (numerales 2 y 11).

En mérito de lo expuesto,

RESUELVE:

CAPÍTULO I.

DISPOSICIONES GENERALES.

ARTÍCULO 1o. OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN. La presente Resolución establece los parámetros y los valores límites máximos permisibles que deberán cumplir quienes realizan vertimientos puntuales a los cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público.

Igualmente, se establecen los parámetros objeto de análisis y reporte por parte de las actividades industriales, comerciales o servicios, de conformidad con el artículo **18** de la presente resolución. En el Anexo 2 se relacionan las actividades industriales, comerciales o de servicios, para las cuales se definieron parámetros y valores límites máximos permisibles específicos y de análisis y reporte.

PARÁGRAFO. La presente resolución no aplica a los vertimientos puntuales que se realicen a aguas marinas o al suelo.

ARTÍCULO 2o. DEFINICIONES. Para la aplicación de la presente resolución se adoptan las siguientes definiciones:

Aguas Residuales Domésticas, (ARD): Son las procedentes de los hogares, así como las de las instalaciones en las cuales se desarrollan actividades industriales, comerciales o de servicios y que correspondan a:

1. Descargas de los retretes y servicios sanitarios.
2. Descargas de los sistemas de aseo personal (duchas y lavamanos), de las áreas de cocinas y cocinetas, de las pocetas de lavado de elementos de aseo y lavado de paredes y pisos y del lavado de ropa (No se incluyen las de los servicios de lavandería industrial).

Aguas Residuales no Domésticas, (ARnD): Son las procedentes de las actividades industriales, comerciales o de servicios distintas a las que constituyen aguas residuales domésticas, (ARD).

CAPÍTULO II.

DISPOSICIONES APLICABLES A LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES.

- 4.1. ARTÍCULO 3o. DEL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA DE VERTIMIENTOS CUANDO LA CAPTACIÓN Y LA DESCARGA SE REALICEN EN EL MISMO CUERPO DE AGUA.** Cuando la captación de agua y la descarga de las aguas residuales se realicen en el mismo cuerpo de agua superficial, se procederá a realizar la sustracción del valor de la carga entre las mismas de las cantidades máxicas (kg) de los metales y metaloides y de los elementos, sustancias o parámetros considerados para la Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales.

Para realizar lo anterior, se utilizan los balances de materia o de masa y las caracterizaciones del agua de la captación y la del vertimiento correspondiente, de acuerdo con la actividad industrial, comercial o de servicios específica.

Una vez efectuada la sustracción, se realiza el cálculo del valor de la concentración del parámetro

en el vertimiento puntual y se hace el respectivo control del cumplimiento de la presente resolución, de acuerdo con los límites máximos permisibles exigidos para la respectiva actividad industrial, comercial o de servicios.

PARÁGRAFO 1o. Los balances de materia o de masa y la realización de la caracterización del(os) vertimiento(s) puntual(es) deberán realizarse simultáneamente en el mismo período de tiempo calendario.

PARÁGRAFO 2o. El balance de materia o de masa debe satisfacer la Ley de Conservación de la Materia o de la Masa.

ARTÍCULO 4o. DE LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES CON SUSTANCIAS

RADIATIVAS O RADIOISÓTOPOS. Las sustancias radiactivas o radioisótopos se rigen por lo dispuesto en la Resolución número 180005 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía “*por la cual se adopta el Reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia*” o aquella que la modifique o sustituya.

ARTÍCULO 5o. DEL PARÁMETRO DE TEMPERATURA Y DE LA ZONA DE

MEZCLA TÉRMICA. Para todas las actividades industriales, comerciales o de servicios que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a un cuerpo de agua superficial o a los sistemas de alcantarillado público, tendrán en el parámetro de temperatura como valor límite máximo permisible el de 40,00 °C.

Para las actividades industriales, comerciales o de servicios (excepto la de generación de energía eléctrica por procesos térmicos (termoeléctricas)), que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, la diferencia de los valores de temperatura en la zona de mezcla térmica del cuerpo de agua superficial receptor con respecto a la temperatura del mismo antes del punto de vertimiento puntual, a una distancia máxima de cien metros (100,00 m) deberá ser menor o igual a 5,00 °C, considerando para las mediciones y determinaciones la sección transversal y perpendicular del cauce del cuerpo de agua receptor.

Para la actividad de generación de energía eléctrica por procesos térmicos (termoeléctricas), que realicen vertimientos puntuales de aguas residuales a cuerpos de aguas superficiales, deberán presentar ante la Autoridad Ambiental competente la siguiente información con los respectivos soportes técnicos:

1. Las determinaciones de las diferencias de los valores de temperatura en la zona de mezcla térmica del cuerpo de agua superficial receptor tomando como referencia las condiciones de la temperatura del mismo antes del punto de vertimiento puntual y simultáneamente.
2. Las determinaciones de los cambios de los componentes fisicoquímicos e hidrobiológicos del cuerpo de agua superficial receptor y tomando como referencia las condiciones del mismo antes del punto de vertimiento puntual.

Ambas determinaciones se hacen considerando para las mediciones la sección transversal y

perpendicular del cauce del cuerpo de agua receptor y deben efectuarse para diferentes periodos climáticos.

Con esta información, la Autoridad Ambiental competente le establecerá:

- a) La diferencia máxima de temperatura a una distancia de cien metros (100,00 m), en la zona de mezcla térmica y simultáneamente.
- b) La distancia máxima a la cual se tiene una diferencia de temperatura menor o igual a 5,00 °C.

Las distancias consideradas en este artículo se determinan como la distancia paralela al eje longitudinal del cuerpo de agua superficial entre el punto de vertimiento y la sección transversal a dicho eje.

Todas las determinaciones y mediciones establecidas en este artículo estarán a cargo del responsable de la actividad industrial, comercial o de servicios, aplicando para tales efectos lo establecido en el Protocolo para el Monitoreo de los Vertimientos en Aguas Superficiales y Subterráneas.

CAPÍTULO III.

VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES MICROBIOLÓGICOS EN VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES (ARD Y ARND) A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES.

- 4.2. **ARTÍCULO 6o. PARÁMETROS MICROBIOLÓGICOS DE ANÁLISIS Y REPORTE EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES (ARD Y ARND) A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES.** Se realizará el análisis y reporte de los valores de la concentración en Número Más Probable (NMP/100mL) de los Coliformes Termotolerantes presentes en los vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARnD) mediante las cuales se gestionen excretas humanas y/o de animales a cuerpos de aguas superficiales, cuando la carga másica en las aguas residuales antes del sistema de tratamiento es mayor a 125,00 Kg/día de DBO5.

PARÁGRAFO. La toma de muestras deberá realizarse de forma simultánea con la caracterización del(os) vertimiento(s) puntual(es), en el mismo período de tiempo que dure la misma y en el mismo punto de la caracterización.

CAPÍTULO VI.

**PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS Y SUS VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES
EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (ARND)
A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES.**

Sector: Actividades productivas de agroindustria y ganadería

4.3. **ARTÍCULO 9o. PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS A MONITOREAR Y SUS VALORES LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES EN LOS VERTIMIENTOS PUNTUALES DE AGUAS RESIDUALES NO DOMÉSTICAS (ARND) A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES DE ACTIVIDADES PRODUCTIVAS DE AGROINDUSTRIA Y GANADERÍA.**

4.4. **Los parámetros fisicoquímicos y sus valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de Aguas Residuales no Domésticas (ARnD) a cuerpos de aguas superficiales de las actividades productivas de agroindustria y ganadería, serán los siguientes:**

Agroindustria

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESAMIENTO DE HORTALIZAS, FRUTAS, LEGUMBRES, RAÍCES Y TUBÉRCULOS	BENEFICIO DE CAFÉ (CLASIFICACIÓN DE LA FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS – FNC/ CENICAFÉ).	
			PROCESO O ECOLÓGICO	PROCESO TRADICIONAL
Generales				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	5,00 a 9,00	5,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	150,00	3.000,00	650,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00	400,00	
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100,00	800,00	400,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	5,00	10,00	10,00
Grasas y aceites	mg/L	10,00	30,00	10,00
Compuesto de fósforo				

Fósforo total (P)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Compuesto de nitrógeno				
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Otros parámetros para análisis y reporte				
Color real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m ⁻¹	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	PROCESOS POSCOSECHAS DE PLÁTANO Y BANANO	PRODUCCIÓN DE AZÚCAR Y DERIVADOS A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR	EXTRACCIÓN DE ACEITES DE ORIGEN VEGETAL
Generales				
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	200,00	900,00	1.500,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	50,00	500,00	600,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	100,00	200,00	400,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	5,00	2,00	2,00
Grasas y aceites	mg/L	10,00	20,00	2,00
Compuestos semivolátiles fenólicos	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Hidrocarburos				
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/L	10,00	10,00	
Compuesto de fósforo				
Orto fosfatos (P-PO ₄ ³⁻)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	

Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Compuestos de Nitrógeno				
Nitratos (N-NO ₃ -)	mg/L		Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO ₂ -)	mg/L		Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L		Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Iones				
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	600,00	500,00	
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00	500,00	
Metales y Metaloides				
Arsénico (As)	mg/L	0,50	0,50	
Cadmio (Cd)	mg/L	0,05	0,05	
Zinc (Zn)	mg/L			
Cobre (Cu)	mg/L			
Cromo (Cr)	mg/L			
Mercurio (Hg)	mg/L			
Níquel (Ni)	mg/L	0,50	0,50	
Plomo (Pb)	mg/L	0,20	0,20	
Otros parámetros para análisis y reporte				
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Color real (medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m-1	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

Ganadería

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE BOVINO, BUFALINO, EQUINO, OVINO Y/O CAPRINO	GANADERÍA DE PORCINOS	GANADERÍA DE PORCINOS
		CRÍA	BENEFICIO	CRÍA	BENEFICIO
Generales					
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	500,00	900,00	900,00	800,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	250,00	450,00	450,00	450,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	150,00	200,00	400,00	200,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	5,00	5,00	5,00	5,00
Grasas y aceites	mg/L	20,00	50,00	20,00	30,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Compuesto de fósforo					
Orto fosfatos (P-PO43-)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Compuesto de nitrógeno					
Nitratos (N-NO3-)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO2-)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH3)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Iones					
Cloruros (Cl-)	mg/L	500,00	500,00		
Sulfatos (SO42-)	mg/L	500,00	500,00		

Otros parámetros para análisis y reporte					
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Cálctica	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Color real (medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m-1	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

PARÁMETRO	UNIDADES	GANADERÍA DE BOVINOS PORCINOS	DE Y	GANADERÍA DE AVES DE CORRAL	DE DE CORRAL
		CRÍA		INCUBACIÓN	CRÍA
Generales					
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00		6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	800,00		400,00	650,00
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO ₅)	mg/L O ₂	450,00		200,00	300,00
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	225,00		200,00	100,00
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/L	5,00		5,00	2,00
Grasas y aceites	mg/L	30,00		20,00	40,00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y reporte		Análisis y reporte	Análisis y reporte
Compuesto de fósforo					
Orto fosfatos (P- PO43-)	mg/L	Análisis y reporte		Análisis y reporte	Análisis y reporte
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y reporte		Análisis y reporte	Análisis y reporte

Compuesto de nitrógeno				
Nitratos (N-NO ₃ -)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitritos (N-NO ₂ -)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH ₃)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Nitrógeno total (N)	mg/L	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Iones				
Cloruros (Cl ⁻)	mg/L	600,00	250,00	250,00
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	mg/L	500,00	250,00	250,00
Otros parámetros para análisis y reporte				
Acidez total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Cálcida	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte
Color real (medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm).	m ⁻¹	Análisis y reporte	Análisis y reporte	Análisis y reporte

**ANEXO B. TABLAS DE CÁLCULOS TERMODINÁMICOS Y TRANSFERENCIA
DE CALOR PARA EL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.**

Tabla 1. Cálculos termodinámicos de la bomba de calor.

ECUACIONES UTILIZADAS	REFERENCIA	DATOS PARA EL AGUA	DATOS PARA EL REFRIGERANTE	RESULTADOS
$P_{vacio} = P_{atm;bga} - P_{sat}$	Presión de vacío necesaria	$T_{sat} = 49 [^{\circ}C]$ $T_7 = T_{sat}$ $T_8 = 23 [^{\circ}C]$ $P_{atm;bga} = 90660 [Pa]$ $P_{sat} = P(Water; T = T_{sat})$	$T_c = 52,77 [^{\circ}C]$ $T_{ev} = -10,98 [^{\circ}C]$ $\Delta T_{sobre} = 5 [^{\circ}C]$ $T_{sobre} = T_{ev} + \Delta T_{sobre}$ $P_c = P(R134a; T = T_c; x = 0)$ $P_e = P(R134a; T = T_{ev}; x = 0)$ $T_1 = T(R134a; P = P_e; h = h_1)$ $T_2 = T(R134a; P = P_e; h = h_2)$ $T_3 = T(R134a; P = P_c; h = h_3)$ $T_4 = T(R134a; P = P_c; h = h_4)$ $T_5 = T(R134a; P = P_c; h = h_5)$	$P_{vacio} = 78915 [Pa]$ $P_c = 1,413e06 [Pa]$ $P_e = 193089 [Pa]$ $T_1 = -10,98 [^{\circ}C]$ $T_2 = -5,98 [^{\circ}C]$ $T_3 = 64,8 [^{\circ}C]$ $T_4 = 52,77 [^{\circ}C]$ $T_5 = 47,21 [^{\circ}C]$
$Q_{ev;lat} = mw * h_{fg;w}$	Calor requerido para evaporar el agua	$mw = 0,001528 \left[\frac{Kg}{s} \right]$	$h_{fg} = hvap(Water; P = Psat)$	$Q_{ev;lat} = 1325 [W]$
$Q_{ev;sen} = mw * cp_l * (T_7 - T_6)$	Calor requerido para calentar el volumen de agua hasta T_{sat}	$T_6 = 23 [^{\circ}C]$ $T_7 = 49 [^{\circ}C]$	$T_{prom} = \frac{(T_6 + T_7)}{2}$ $cp_l = cp(Water; T = T_{prom}; x = 0)$	$Q_{ev;sen} = 166,2 [W]$
$Q_{c;BC} = Q_{ev;sen} + Q_{ev;lat}$	Calor requerido para evaporar el volumen de agua o condensar el refrigerante.			$Q_{c;BC} = 1491 [W]$

$Q_{ev;BC} = mw * h_{fg;w}$	Calor requerido para condensar el volumen de agua o evaporar el refrigerante.			$Q_{ev;BC} = 1325 [W]$
$Q_{c;BC} = mr * (h_3 - h_4)$	Calor requerido para condensar el refrigerante		$h_3 = h(R134a; P = P_c; S = S_3)$ $h_4 = h(R134a; P = P_c; X = X_4)$ $S_2 = s(R134a; P = P_e; T = T_{sobre})$ $S_2 = S_3$ $X_4 = 0,12$	$mr = 0.01026 \left[\frac{Kg}{s} \right]$ $h_3 = 290869 \left[\frac{J}{Kg} \right]$ $h_4 = 145616 \left[\frac{J}{Kg} \right]$ $S_2 = 942.9 \left[\frac{J}{Kg * K} \right]$
$Q_{ev;BC} = mr * (h_{2;sat} - h_1)$	Calor requerido para evaporar el refrigerante.		$h_{2;sat} = h(R134a; P = P_e; x = 1)$	$h_1 = 119102 \left[\frac{J}{Kg} \right]$ $h_{2;sat} = 243922 \left[\frac{J}{Kg} \right]$
$Q_{sobre} = mr * (h_2 - h_{2;sat})$	Calor requerido para generar un sobrecalentamiento de 5°C		$h_2 = h(R134a; P = P_e; T = T_{sobre})$	$Q_{sobre} = 43,55 [W]$ $h_2 = 248166 \left[\frac{J}{Kg} \right]$
$Q_{c;aux} = mr * (h_4 - h_5)$	Calor del condensador auxiliar para realizar el subenfriamiento		$h_5 = h_1$	$Q_{c;aux} = 272,1[W]$
$W_c = mr * (h_3 - h_2)$	Trabajo del compresor			$W_c = 438,3 [W]$

Tabla 2. Correlaciones empleadas en los cálculos de la transferencia de calor en el evaporador del sistema (Agua).

ECUACIÓN	REFERENCIA	DATOS	RESULTADOS
$Q_{R134a}^{Cond} = \frac{\Delta T_{R134a}^{Cond}}{R_{R134a}^{Cond}}$ $\Delta T_{R134a}^{Cond} = T_C - T_{Sat}$ $R_{R134a}^{Cond} = R_{refri} + R_{pared} + R_{agua}$ $R_{R134a}^{Cond} = \frac{1}{U_{int_c} * A_{int_c}} = \frac{1}{U_{ext_c} * A_{ext_c}}$	<p>Calor requerido para evaporar una masa de agua.</p> Q_{R134a}^{Cond} <p>Ec.11–15 T. de C. Cengel, 4° ed.</p>	$D_{int} = 0.01092 [m]$ $D_{ext} = 0.0127 [m]$ $N_{tubos} = 41$	$L_{cond} = 0.5502 [m]$ $R_{R134a}^{Cond} = 0,002529 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$ $U_{int_c} = 510,9 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$ $U_{ext_c} = 439,4 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$
<p>CONDENSACIÓN DE REFRIGERANTE EN LOS TUBOS:</p> $R_{refri} = \frac{1}{h_{refri} * A_{int_c}}$ $A_{int_c} = \pi * D_{int} * L_{cond} * N_{tubos}$ $h_{refri} = 0.0077 * Re_{R134a_{liq}}^{0.4} * \left[\frac{K_{R134a_{liq}}^3 * \rho_{R134a_{liq}} * (\rho_{R134a_{liq}} - \rho_{R134a_{vap}}) * g}{\mu_{R134a_{liq}}^2} \right]^{1/3}$	<p>Resistencia térmica del fluido refrigerante.</p> <p>Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del refrigerante</p> h_{refri} <p>Tabla 3. Ec 6. 2009 ASHRAE Handbook Fundamentals.</p> <p>Correlaciones para flujo interno en cambio</p>	$T_{wi} = 51$ $K_{R134a_{liquido}} = K(R134a; T = T_C; X = 0)$ $Pr_{R134a_{liquido}} = Pr(R134a; T = T_C; X = 0)$	$R_{refri} = 0,0007619 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$ $h_{refri} = 1696 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$ $A_{int_c} = 0,774 [m^2]$

$\dot{q}_{ew} = h_{refri} * (T_c - T_{wi})$ $Re_{R134a_{liq}} = \frac{G_{cond} * D_{int}}{\mu_{R134a_{liq}}}$ $G_{cond} = \frac{4 * \dot{m}_{R134a}}{\pi * D_{int}^2}$	de fase en tubos verticales.	$\mu_{R134a_{liquido}} = \mathbf{Visc}(R134a; T = T_c; X = 0)$ $\rho_{rl} = \rho(R134a; T = T_c; x = 0)$ $\rho_{rv} = \rho(R134a; T = T_c; x = 1)$ $X_4 = 0.12$	
PARED: $R_{pared} = \frac{\ln \left[\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right]}{2 * \pi * K_{cobre} * L_{cond} * N_{tubos}}$	Resistencia térmica de las paredes de los diversos tubos de cobre. Ec. 11-1 T. de C. Cengel.	Conductividad cobre: $K_{cobre} = 330 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$	$R_{pared} = 0,000003547 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$
EVAPORACIÓN DE AGUA EN EL CASCO: $R_{agua} = \frac{1}{h_{agua} * A_{ext}}$ $A_{ext_c} = \pi * D_{ext} * L_{cond} * N_{tubos}$ $\dot{q}_{cond} = h_{agua} * \Delta T_{exc}$ $\Delta T_{exc} = T_{wc} - T_{sat}$	Resistencia térmica del agua Cálculo del coeficiente de transferencia de calor del agua por medio del flujo de calor en la ebullición Ec. 10.1 T. de C. Cengel.	$\sigma = 0.0696$ $C_{sf} = 0.013$ $n = 1$ $T_{prom} = \frac{T_{sat} + T_{wc}}{2}$ $T_{wc} = 50 [^\circ C]$	$h_{agua} = 630,1 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$ $R_{agua} = 0.001763 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$ $A_{ext} = 0,9 [m^2]$

$\frac{Cp_{agua_{liq}} * (T_{Supext} - T_{sat})}{C_{sf} * H_{FG_{agua}} * Pr_{agua_{liq}}^n}$ $= \left[\frac{\dot{q}_{cond}}{\mu_{agua_{liq}} * H_{FG_{agua}}} * \left(\frac{\sigma}{g * (\rho_{agua_{liq}} - \rho_{agua_{vapor}})} \right)^{(0.5)} \right]^{(0.33)}$	<p>Correlacion para el flujo de calor en el régimen de ebullición nucleada. Ec.10.2 T. de C. Cengel.</p> <p>σ : Tensión superficial de la interfase liquido vapor para el agua. Tabla 10.1 T. de C. Cengel.</p> <p>C_{sf} : Constante experimental dependiente de la combinación superficie fluido. Tabla 10.3 T. de C. Cengel.</p> <p>n : Constante experimental que depende del fluido. Tabla 10.3 T. de C. Cengel.</p>	$\rho_{agua_{liq}} = \rho(\text{water}; T = T_{prom}; X = 0)$ $\rho_{agua_{vapor}} = \rho(\text{water}; T = T_{prom}; X = 1)$ $\mu_{agua_{liq}} = \text{Visc}(\text{water}; T = T_{prom}; X = 0)$ $Cp_{agua_{liq}} = Cp(\text{water}; T = T_{prom}; X = 0)$ $Pr_{agua_{liq}} = Pr(\text{water}; T = T_{prom}; X = 0)$	$\dot{q}_{cond} = 3151 \left[\frac{W}{\text{°C}} \right]$
---	---	---	--

Tabla 3. Correlaciones empleadas en los cálculos de la transferencia de calor en el condensador del sistema (Agua).

ECUACIONES UTILIZADAS	REFERENCIA	DATOS	RESULTADOS
$Q_{R134a}^{evap} = \frac{(\Delta T_{R134a}^{evap})}{R_{R134a}^{evap}}$ $\Delta T_{R134a}^{evap} = T_{sat} - T_{ev}$ $R_{R134a}^{evap} = R_{agua} + R_{pared} + R_{refri}$ $R_{R134a}^{evap} = \frac{1}{U_{ext, evap} * A_{ext, evap}}$ $= \frac{1}{U_{int, evap} * A_{int, evap}}$	<p>Calor requerido para condensar un volumen de agua o evaporar un volumen de refrigerante.</p> <p>Ec. 11-15. T. de C. Cengel, 4°ed.</p>	<p>Geométricos:</p> $D_{int} = 0,01092 [m]$ $D_{ext} = 0,0127 [m]$ $N_{tubos} = 21$ $N_{tubos}^{fila} = \frac{(3 + 5 + 5 + 5 + 3)}{5} = 4$	$L_{evap} = 0,2632 [m]$ $R_{R134a}^{evap} = 0.04528 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$ $U_{ext, evap} = 100,1 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$ $U_{int, evap} = 116,5 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$

<p>CONDENSACIÓN DE AGUA EN EL CASCO:</p> $R_{agua} = \frac{1}{h_{agua,evap} * A_{ext,evap}}$ $h_{agua,evap} = 0,725$ $* \left[\frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * K_l^3 * h_{fg,e}}{N_{tubos}^{fila} * \mu_l * D_{ext} * (T_{sat} - T_{wo})} \right]^{\frac{1}{4}}$ $h_{fg,e} = h_{fg} + 0,68 * C_{p_l} * (T_{sat} - T_{wo})$ $A_{ext,evap} = \pi * D_{ext} * L_{evap} * N_{tubos}$	<p>Coeficiente de transferencia de calor promedio en la condensación de película para un arreglo de tubos horizontales teniendo en cuenta el número de tubos en una hilera vertical</p> <p>Ec. 10-31. T. de C. Cengel, 4°ed.</p>	<p>Agua:</p> $g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ $T_{wo} = 19,11 \left[^\circ C \right]$ $P_{sat} = P(Water; T = T_{sat})$ $h_{fg} = h_{vap}(Water; P = P_{sat})$ $T_{prop} = \frac{(T_{sat} + T_{wo})}{2}$ $K_l = K(Water; T = T_{prop}; x = 0)$ $\rho_l = \rho(Water; T = T_{prop}; x = 0)$ $\rho_v = \rho(Water; T = T_{sat}; x = 1)$ $C_{p_l} = C_p(Water; T = T_{prop}; x = 0)$ $\mu_l = \text{visc}(Water; T = T_{prop}; x = 0)$	$h_{agua,evap} = 5981 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$ $A_{ext,evap} = 0,2205 [m^2]$ $R_{agua} = 0.0007583 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$
<p>RESISTENCIA TERMICA DEL TUBO</p> $R_{pared} = \frac{\ln \left[\frac{D_{ext}}{D_{int}} \right]}{2\pi * K_{cobre} * L_{evap} * N_{tubos}}$	<p>Resistencia térmica de las paredes de los diversos tubos de cobre.</p> <p>Ec. 11-1. T. de C. Cengel, 4°ed.</p>	<p>Cobre:</p> $K_{cobre} = 330 \left[\frac{W}{m * ^\circ C} \right]$	$R_{pared} = 0.00001448 \left[\frac{^\circ C}{W} \right]$

<p style="text-align: center;">EVAPORACIÓN DE REFRIGERANTE EN LOS TUBOS:</p> $R_{refri} = \frac{1}{h_{refri} * A_{int,evap}}$ $A_{int,evap} = \pi * D_{int} * L_{evap} * N_{tubos}$ $h_{refri} = h_f * \left[1,136 * \left(\frac{\rho_{rl}}{\rho_{rv}} \right)^{0,45} * Xin^{0,72} * (1 - Xin)^{0,08} * f_2 * Fr_l + 667,2 * Bo^{0,7} * (1 - Xin)^{0,8} * F_{fl} \right]$ $h_f = \frac{(Re_l - 1000) * Pr_{rl} * \frac{f}{2} * \frac{K_{rl}}{D_{int}}}{1 + 1,27 * \left(Pr_{rl}^{\frac{2}{3}} - 1 \right) * \left(\frac{f}{2} \right)^{0,5}}$ $Re_l = \frac{G_e * (1 - Xin) * D_{int}}{\mu_{rl}}$ $G_e = \frac{4 * m \dot{r}}{\pi * D_{int}^2}$ $f = (1,58 * \ln(Re_l) - 3,28)^{-2}$ $Fr_l = \frac{G_e^2}{\rho_{rl}^2 * g * D_{int}}$ $Bo = \frac{\dot{q}_e}{G_e * h_{lv}}$ $\dot{q}_e = h_{refri} * (T_{wi} - T_{ev})$	<p style="text-align: center;">Coeficiente de transferencia de calor mediante ebullición convectiva con la correlación de Kandlikar.</p> <p style="text-align: center;">Tabla 2. Ecuación. T2.2b. 2009. ASHRAE Handbook Fundamentals.</p>	<p style="text-align: center;">Refrigerante:</p> $T_{wi} = 19 [^{\circ}C]$ $f_2 = 1$ $F_{fl} = 1,63$ $Xin = 0,396$ $\rho_{rl} = \rho (R134a; T = T_{ev}; x = 0)$ $\rho_{rv} = \rho (R134a; T = T_{ev}; x = 1)$ $Pr_{rl} = Pr(R134a; T = T_{ev}; x = 0)$ $K_{rl} = K(R134a; T = T_{ev}; x = 0)$ $\mu_{rl} = Visc (R134a; T = T_{ev}; x = 0)$ $h_{lv} = h_{vap}(R134a; T = T_{ev})$	$R_{refri} = 0.04451 \left[\frac{^{\circ}C}{W} \right]$ $h_{refri} = 118,5 \left[\frac{W}{m^2 * ^{\circ}C} \right]$ $A_{int,evap} = 0,1896 [m^2]$ $\dot{q}_e = 950,2 \left[\frac{W}{m^2} \right]$
--	---	---	--

Tabla 4. Cálculos para el diseño del diámetro de la carcasa del condensador de agua.

Ecuación	Referencia	Datos	Resultados
$D_{i_e} = D_{o_e} - (2 * L_{twe})$ $\frac{L_{tpe}}{D_{o_e}} = 1.38$ $\theta_{tp} = 90^\circ$	<p>Ecuación para hallar el espesor del tubo de cobre (L_{twe}). Ítem 4.</p> <p>Relación para conocer el paso de disposición de los tubos (L_{tpe}). Tabla 8.</p> <p>θ_{tp}: Ángulo de disposición geométrica de los tubos. Ítem 7.</p>	$D_{o_e} = 0,0127 [m]$ $D_{i_e} = 0,01092 [m]$	$L_{twe} = 0.000889 [m]$ $L_{tpe} = 0.01753 [m]$
$L_{to_e} = L_e + 2 * L_{tse}$ $L_{tse} = 0.5 * D_{se} * \sqrt{\frac{P_{sat}}{\sigma_{ts}}}$	<p>Ecuación para hallar la longitud nominal de los tubos (L_{to_e}). Ec. (3).</p> <p>Ecuación para estimar el espesor de la placa de tubos (L_{tse}), mediante el diámetro interno del casco (D_{se}). Ec. (2).</p>	$L_e = 0.2632 [m]$ <p>L_e: longitud efectiva de transferencia de calor.</p> $\sigma_{ts} = 520 * 10^6 [Pa]$ <p>σ_{ts}: resistencia ultima a la tracción del acero inoxidable.</p> $P_{sat} = 11745 [Pa]$ <p>P_{sat}: Presión de saturación del vapor.</p>	$L_{to_e} = 0.2641 [m]$ $L_{tse} = 0.0004527 [m]$
$D_{otl_e} = D_{se} - L_{bbe}$	<p>Ecuación para calcular el diámetro del circulo circunscrito del campo del</p>		$D_{otl_e} = 0.1036 [m]$

$D_{ctl_e} = D_{otl_e} - D_{o_e}$ $N_{t,e} = \frac{0.78 * D_{ctl_e}^2}{C_r * L_{tp_e}^2}$ $\frac{D_{s_e}}{D_{o_e}} = 15$	<p>haz de tubos (D_{otl_e}), mediante la holgura del bypass del haz del diámetro de la carcasa interior (L_{bbe}). Ec. (20a).</p> <p>Ecuación para calcular el diámetro del círculo a través de los centros de las filas externas del tubo (D_{ctl_e}), mediante el número de tubos en el condensador de agua ($N_{t,e}$). Ec. (16).</p> <p>Relación que se explica en el ítem 2 y sale de la figura 1.</p>	$N_{t,e} = 21$ $C_r = 1$ <p>C_r: Constante que depende de la disposición de los tubos.</p>	$D_{ctl_e} = 0.09094 [m]$ $L_{bbe} = 0.08686 [m]$ $D_{s_e} = 0.1905 [m]$
$V_{nsmax,e} = \sqrt{\frac{750}{\rho_s}}$ $D_{nsmin,e} = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_w}{\pi * \rho_s * V_{nsmax,e}}}$ $L_{ns_e} = 0.25 * D_{nsmin,e}$	<p>Ecuación para calcular la velocidad máxima de vapor en la salida de la boquilla o entrada al condensador de agua ($V_{nsmax,e}$). Ec. (11b).</p> <p>Ecuación para calcular el diámetro mínimo de la boquilla de entrada de vapor ($D_{nsmin,e}$). Ec. (15).</p> <p>Ecuación para calcular la distancia para que el área de flujo de escape sea igual al área de la boquilla (L_{ns_e}). Ec. (13).</p>	$\dot{m}_v = 0.0005556 [Kg/s]$ $\rho_s = \rho(\text{water}; P = P_{Sat}; T = T_{Sat})$	$V_{nsmax,e} = 0.8703 [m/s]$ $D_{nsmin,e} = 0.000906 [m]$ $L_{ns_e} = 0.0002265 [m]$

Tabla 5. Cálculos para el diseño del diámetro de la carcasa del evaporador de agua.

Ecuación	Referencia	Datos	Resultados
$D_{i_c} = D_{o_c} - (2 * L_{tw_c})$ $\frac{L_{tp_c}}{D_{o_c}} = 1.38$ $\theta_{tp} = 45^\circ$	<p>Ecuación para hallar el espesor del tubo de cobre (L_{tw_c}). Ítem 4.</p> <p>Relación para conocer el paso de disposición de los tubos (L_{tp_c}). Tabla 8.</p> <p>θ_{tp}: Ángulo de disposición geométrica de los tubos. Ítem 7.</p>	$D_{o_c} = 0,0127 [m]$ $D_{i_c} = 0,01092 [m]$	$L_{tp_c} = 0.01753 [m]$ $L_{tw_c} = 0.000889 [m]$
$L_{to_c} = L_c + 2 * L_{ts_c}$ $L_{ts_c} = 0.5 * D_{s_c} * \sqrt{\frac{P_{sat}}{\sigma_{ts}}}$	<p>Ecuación para hallar la longitud nominal de los tubos (L_{to_c}). Ec. (3).</p> <p>Ecuación para estimar el espesor de la placa de tubos (L_{ts_c}), mediante el diámetro interno del casco (D_{s_c}). Ec. (2).</p>	$L_c = 0.5502 [m]$ <p>L_c: longitud efectiva de transferencia de calor.</p> $\sigma_{ts} = 520 * 10^6 [Pa]$ <p>σ_{ts}: resistencia ultima a la tracción del acero inoxidable.</p> $P_{sat} = 11745 [Pa]$ <p>P_{sat}: Presión de saturación del vapor.</p>	$L_{to_c} = 0.5511 [m]$ $L_{ts_c} = 0.0004527 [m]$
$D_{otl_c} = D_{s_c} - L_{bb_c}$ $D_{ctl_c} = D_{otl_c} - D_{o_c}$	<p>Ecuación para calcular el diámetro del círculo circunscrito del campo del haz de tubos (D_{otl_c}), mediante la holgura</p>	$N_{t,c} = 40$	$D_{otl_c} = 0.1398 [m]$ $D_{ctl_c} = 0,1271 [m]$

$N_{t;c} = \frac{0.78 * D_{ctl_c}^2}{C_r * L_{tp_c}^2}$ $\frac{D_{s_c}}{D_{o_c}} = 30$	<p>del bypass del haz del diámetro de la carcasa interior (L_{bb_c}). Ec. (20a).</p> <p>Ecuación para calcular el diámetro del círculo a través de los centros de las filas externas del tubo (D_{ctl_c}), mediante el número de tubos en el evaporador de agua ($N_{t;c}$). Ec. (16).</p> <p>Relación que se explica en el ítem 2 y sale de la figura 1.</p>	$C_r = 1$ <p>C_r: Constante que depende de la disposición de los tubos.</p>	$L_{bb_c} = 0.05073 [m]$ $D_{s_c} = 0.1905 [m]$
$V_{ns_{max;c}} = \sqrt{\frac{750}{\rho_s}}$ $D_{ns_{min;c}} = \sqrt{\frac{4 * \dot{m}_w}{\pi * \rho_s * V_{ns_{max;c}}}}$ $L_{ns_c} = 0.25 * D_{ns_{min;c}}$	<p>Ecuación para calcular la velocidad máxima de vapor en la salida de la boquilla o entrada al evaporador de agua ($V_{ns_{max;c}}$). Ec. (11b).</p> <p>Ecuación para calcular el diámetro mínimo de la boquilla de entrada de vapor ($D_{ns_{min;c}}$). Ec. (15).</p> <p>Ecuación para calcular la distancia para que el área de flujo de escape sea igual al área de la boquilla (L_{ns_c}). Ec. (13).</p> <p>Sección 3.3.5. HEDH (Heat Exchanger Desing Handbook).</p>	$\dot{m}_w = 0.001528 [Kg/s]$ $\rho_s = \rho(\text{water}; P = P_{Sat}; T = T_{Sat})$	$L_{ns_c} = 0.0002265 [m]$ $D_{ns_{min;c}} = 0.000906 [m]$ $V_{ns_{max;c}} = 0.8703 [m/s]$

Tabla 6. Cálculos para la tubería de vapor.

Perdidas en tubería de vapor			
Ecuación	Referencia	Datos	Resultados
$\dot{Q} = V * A$ $A = \frac{\pi}{4} * D^2$	<p>Cálculo del diámetro de la tubería de vapor. Correlación para determinar el diámetro de la tubería de vapor conociendo el flujo volumétrico y la velocidad.</p>	$\dot{Q} = 5,5 \left[\frac{lt}{h} \right]$ $\dot{Q} = 0,000001528 \left[\frac{m^3}{s} \right]$	$D = 0,0508 \text{ [m]}$ $V = 0,0007538 \text{ [m/s]}$ $A = 0,002027 \text{ [m}^2\text{]}$
$h_f = \frac{f * L * V^2}{2 * g * D}$	<p>Correlación para conocer la pérdida de altura presente en la tubería de vapor.</p> <p>Ecuación 23.6. W. F. STOECKER. Refrigeración y acondicionamiento de aire.</p>	$L = 0.3[m]$ $g = 9.81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$	$h_f = 3,577e - 8[m]$
$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log \left[\frac{R_a}{3.7} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right]$	<p>Correlación de White-Colebrook para determinar el factor de fricción en tubería rugosa y flujo turbulento.</p> <p>Cap 2, pág 41. Junta de Castilla y León. Manual Técnico, diseño y cálculo de redes de vapor.</p>		$f = 0,2092$
$R_a = \frac{\varepsilon}{D}$	<p>R_a: Rugosidad relativa de la tubería de acero inoxidable para vapor. ε: rugosidad absoluta de la tubería de acero inoxidable para vapor.</p>	$R_a = 1 \text{ [}\mu\text{m]}$	$\varepsilon = 0,05080[\mu\text{m}]$

	Cap 2, pág 34. Junta de Castilla y León. Manual Técnico, diseño y cálculo de redes de vapor.		
$Re = \frac{V * D}{\nu}$	Numero de Reynolds Cap 2, pág 35. Junta de Castilla y León. Manual Técnico, diseño y cálculo de redes de vapor.	$\nu = (\text{water}; T = T_{sat}; P = P_{sat})$	$Re = 68,03$

**ANEXO C. CÓDIGO EN EES DEL DISEÑO TERMICO PARA EL SISTEMA DE
EVAPORACIÓN AL VACÍO.**

Programa para el diseño de un sistema termico para tratamiento de aguas residuales avícolas

Datos de entrada

R\$ = 'R134a' *Refrigerante a utilizar*

$T_c = 52,77$ °C: *Temperatura de condensación del refrigerante*

$T_e = -10,98$ °C: *Temperatura de evaporación del refrigerante*

$T_{sat} = 49$ °C: *Temperatura de saturación del agua*

$T7 = T_{sat}$ °C: *Temperatura de salida del vapor de agua*

$T8 = 23$ °C: *Temperatura a la salida del condensador de agua*

$T6 = 23$ °C: *Temperatura a la entrada del evaporador de agua*

Factor_{de,funcionamiento} = COP + 1

$$COP = \frac{Q_{ev_{BC}}}{W_c}$$

$$\Delta T_{sub} = T_4 - T_5$$

Grados de subenfriamiento en el condensador de refrigerante

$$\Delta T_{sobre} = 5$$

Grados de sobrecalentamiento en el evaporador de refrigerante

$$T_{sobre} = T_e + \Delta T_{sobre} \quad T2: \text{temperatura a la salida del evaporador de refrigerante}$$

Cálculo de la presión de vacío

$$P_{atm;bga} = 90660$$

Presión atmosférica de Bucaramanga [Pa]

$$P_{vacío} = P_{atm;bga} - P_{sat}$$

$$P_{sat} = P_{sat} [\text{water}; T = T_{sat}]$$

$$mw = \frac{5,5}{3600} \quad \text{la que calienta al inicio del ciclo}$$

$$mv = \frac{2}{3600}$$

la que evapora ctemente, lo que hace que de 0 el sub enfriamiento

Análisis de la bomba de calor- refrigerante

Propiedades termodinamicas

$$P_c = \mathbf{P} [\text{R\$} ; T = T_c ; x = 0]$$

$$P_e = \mathbf{P} [\text{R\$} ; T = T_e ; x = 0]$$

$$h_{2,\text{sat}} = \mathbf{h} [\text{R\$} ; P = P_e ; x = 1]$$

$$h_2 = \mathbf{h} [\text{R\$} ; P = P_e ; T = T_{\text{sobre}}]$$

$$S_2 = \mathbf{s} [\text{R\$} ; P = P_e ; T = T_{\text{sobre}}]$$

$$S_2 = S_3$$

$$h_3 = \mathbf{h} [\text{R\$} ; P = P_c ; s = S_3]$$

$$h_{3,\text{sat}} = \mathbf{h} [\text{R\$} ; P = P_c ; x = 1]$$

$$h_4 = \mathbf{h} [\text{R\$} ; P = P_c ; x = x_4]$$

$$x_4 = 0,12$$

$$h_5 = h_1$$

$$h_{w,1} = \mathbf{h} [\text{water} ; T = T_{\text{sat}} ; x = 1]$$

$$h_{w,0} = \mathbf{h} [\text{water} ; T = T_{\text{sat}} ; x = 0]$$

$$h_w = \mathbf{h} [\text{water} ; T = T_6 ; P = P_{\text{vacio}}]$$

$$T_1 = \mathbf{T} [\text{R\$} ; P = P_e ; h = h_1]$$

$$T_2 = \mathbf{T} [\text{R\$} ; P = P_e ; h = h_2]$$

$$T_3 = T [R\$\ ; P = P_c ; h = h_3]$$

$$T_4 = T [R\$\ ; P = P_c ; h = h_4]$$

$$T_5 = T [R\$\ ; P = P_c ; h = h_5]$$

$$s_1 = s [R134a ; T = T_1 ; h = h_1]$$

$$s_4 = s [R134a ; T = T_4 ; h = h_4]$$

$$s_5 = s [R134a ; T = T_5 ; h = h_5]$$

$$s_w = s [water ; T = T_6 ; h = h_w]$$

$$s_{w,0} = s [water ; T = T_{sat} ; h = h_{w,0}]$$

$$s_{w,1} = s [water ; T = T_{sat} ; h = h_{w,1}]$$

CALORES

Agua

$$Q_{ev,sen} = m_w \cdot C_{p1} \cdot [T_7 - T_6]$$

Calor sensible en el evaporador de agua

$$C_{p1} = C_p [water ; T = T_{prom,Cp1} ; x = 0] \quad \text{Calor específico del agua}$$

$$T_{prom,Cp1} = \frac{T_6 + T_7}{2}$$

Temperatura promedio para calcular el Cp

$$Q_{ev,lat} = m_v \cdot H_{fg,w}$$

Calor latente en el evaporador de agua

$$H_{fg,w} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} [water ; P = P_{sat}]$$

Energía requerida para el cambio de fase del agua

$$Q_{cBC} = Q_{ev,sen} + Q_{ev,lat}$$

Calor requerido para evaporar el agua

$$Q_{c, \text{lat}} = m v \cdot H_{f, g, w} \quad \text{Calor latente en el condensador de agua}$$

$$Q_{\text{ev}_{\text{BC}}} = Q_{c, \text{lat}} \quad \text{Calor requerido para condensar el agua}$$

Bomba de Calor

$$Q_{c, \text{BC}} = m r \cdot [h_3 - h_4]$$

Calor requerido para condensar el refrigerante, define el valor de mr

$$Q_{\text{ev}_{\text{BC}}} = m r \cdot [h_2 - h_1]$$

Calor requerido para evaporar el refrigerante, define el valor de h1 cuando se conoce mr

$$Q_{c, \text{aux}} = m r \cdot [h_4 - h_5]$$

Calor en el condensador auxiliar que realiza el subenfriamiento

$$W_c = m r \cdot [h_3 - h_2] \quad \text{Trabajo del compresor}$$

$$Q_{r, \text{sen}} = m r \cdot [h_3 - h_{3, \text{sat}}]$$

$$Q_c = m r \cdot [h_{3, \text{sat}} - h_4]$$

$$Q_{\text{sobre}} = m r \cdot [h_2 - h_{2, \text{sat}}]$$

Calor necesario para lograr 5 grados de sobrecalentamiento en el refrigerante

TRANSFERENCIA DE CALOR

EVAPORADOR DE REFRIGERANTE y CONDENSADOR DE AGUA

$$Q_{\text{ev}_{\text{BC}}} = \frac{\Delta T_e}{R_e}$$

Calor por concepto de resistencia térmica

$$\Delta T_e = T_{\text{sat}} - T_e \quad \text{La diferencia de temperatura es cte}$$

$$R_e = \frac{1}{U_{o, e} \cdot A_{o, e}}$$

Resistencia termica en el evaporador de refrigerante y condensador de agua

$$R_e = \frac{1}{U_{i,e} \cdot A_{i,e}}$$

$$R_e = R_{e,agua} + R_{e,pared} + R_{e,refri}$$

Suma de resistencias en el evaporador de refrigerante y condensador de agua

$$d_{i,e} = 0,010922$$

Diametro interno del tubo de cobre 1/2" segun el catalogo de nacobre [m]

$$d_{o,e} = 0,0127$$

Diametro externo del tubo de cobre 1/2" segun el catalogo de nacobre [m]

$$N_{t,e} = 21 \quad \text{Numero de tubos en el condensador de agua}$$

$$N_{t,filas} = \frac{3 + 5 + 5 + 5 + 3}{5}$$

Numero de filas en el condensador de agua, se tiene 2 filas con 3 tubos y 3 filas con 5 tubos. Ref. pag 113 proyecto de un condensador. Stoecker

$$T_{W_{o,e}} = 19,11 \quad ^\circ\text{C: Temperatura superficial externa en los tubos del condensador de agua}$$

Resistencia del agua en el evaporador de refrigerante y condensador de agua

$$R_{e,agua} = \frac{1}{h_{agua,e} \cdot A_{o,e}}$$

$$A_{o,e} = \pi \cdot d_{o,e} \cdot L_e \cdot N_{t,e}$$

Area superficial exterior de los tubos en contacto con el agua [m²]

$$h_{agua,e} = 0,725 \cdot \left[\frac{gr \cdot \rho_{lw,e} \cdot (\rho_{lw,e} - \rho_{vw,e}) \cdot K_{lw,e}^3 \cdot h_{fg,e}}{N_{t,filas} \cdot \mu_{lw,e} \cdot d_{o,e} \cdot (T_{sat} - T_{W_{o,e}})} \right]^{1/4}$$

Coficiente de transferencia de calor por convección para condensacion en pelicula sobre una hilera de tubos horizontales [W/m²°C]*

$$gr = 9,81 \quad \text{Gravedad [m/s²]}$$

$$T_{prom,e} = \frac{T_{sat} + T_{W_{o,e}}}{2} \quad ^\circ\text{C: Temperatura promedio para el cálculo de las propiedades}$$

$$\rho_{lw,e} = \rho[\text{water}; T = T_{prom,e}; x = 0]$$

Densidad del agua en estado liquido a la temperatura prom [Kg/m³]

$$\rho_{w,v,e} = \rho [\text{water} ; T = T_{\text{sat}} ; x = 1]$$

Densidad del vapor de agua a la temperatura de saturación [Kg/m³]

$$K_{l,w,e} = k [\text{water} ; T = T_{\text{prom},e} ; x = 0]$$

Conductividad del agua líquida [W/m^{°C}]

$$h_{fg,e} = H_{fg,w} + 0,68 \cdot C_{p,l,w,e} \cdot [T_{\text{sat}} - T_{w,o,e}]$$

Calor latente modificado [J/kg]

$$C_{p,l,w,e} = \mathbf{Cp} [\text{water} ; T = T_{\text{prom},e} ; x = 0]$$

Calor específico del agua líquida [J/kg^{°C}]

$$\mu_{l,w,e} = \mathbf{Visc} [\text{water} ; T = T_{\text{prom},e} ; x = 0]$$

Viscosidad dinámica del agua líquida [kg/m^{°s}]

$$\mu_{v,w,e} = \mathbf{Visc} [\text{water} ; T = T_{\text{prom},e} ; x = 1]$$

Viscosidad dinámica del vapor de agua [kg/m^{°s}]

Resistencia de la pared de los tubos en el evaporador de refrigerante y condensador de agua

$$Re_{\text{pared}} = \frac{\ln \left[\frac{d_{o,e}}{d_{i,e}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot K_{c,e} \cdot L_e \cdot N_{t,e}}$$

$$K_{c,e} = 300 \quad \text{Conductividad térmica del cobre [W/m^{°C}]}$$

Resistencia del refrigerante en el evaporador de refrigerante y condensador de agua

$$Re_{\text{refri}} = \frac{1}{h_{\text{refri},e} \cdot A_{i,e}}$$

$$A_{i,e} = \pi \cdot d_{i,e} \cdot L_e \cdot N_{t,e} \quad \text{Área superficial interna de los tubos [m²]}$$

$$h_{\text{refri},e} = h_f \cdot \left[1,136 \cdot \left(\frac{\rho_{l,r,e}}{\rho_{v,r,e}} \right)^{0,45} \cdot x_{in}^{0,72} \cdot (1 - x_{in})^{0,08} \cdot f_2 \cdot Fr_1 + 667,2 \cdot Bo^{0,7} \cdot (1 - x_{in})^{0,8} \cdot F_{fl} \right]$$

Coefficiente de transferencia de calor por ebullición meramente convectiva (correlación de Kandlikar) [W/m²°C]

$$h_f = \frac{[Re_{l,r,e} - 1000] \cdot Pr_{l,r,e} \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{K_{l,r,e}}{d_{i,e}}}{1 + 12,7 \cdot [Pr_{l,r,e}^{(2/3)} - 1] \cdot \left[\frac{f}{2}\right]^{0,5}}$$

Coefficiente de transferencia de calor donde todo el fluido se considera liquido

$$Re_{l,r,e} = \frac{G_e \cdot [1 - x_{in}] \cdot d_{i,e}}{\mu_{l,r,e}}$$

$$G_e = \frac{4 \cdot m_r}{\pi \cdot d_{i,e}^2} \quad \text{Gasto [kg/m}^2\text{*s]}$$

$$x_{in} = x [R\$; T = T_1 ; h = h_1]$$

Calidad a la entrada del vapor refrigerante

$$\mu_{l,r,e} = \text{Visc} \left[R\$; T = \frac{T_1 + T_2}{2}; x = 0 \right]$$

*Viscosidad dinamica del refrigerante liquido [Kg/m*s]*

$$Pr_{l,r,e} = Pr \left[R\$; T = \frac{T_1 + T_2}{2}; x = 0 \right] \quad \text{Numero de Prandtl}$$

$$f = [1,58 \cdot \ln (Re_{l,r,e}) - 3,28]^{-2}$$

$$K_{l,r,e} = k \left[R\$; T = \frac{T_1 + T_2}{2}; x = 0 \right]$$

*Conductividad del refrigerante liquido [W/m**C]*

$$\rho_{l,r,e} = \rho \left[R\$; T = \frac{T_1 + T_2}{2}; x = 0 \right]$$

Densidad del refrigerante liquido [kg/m³]

$$\rho_{v,r,e} = \rho \left[R\$; T = \frac{T_1 + T_2}{2}; x = 1 \right]$$

Densidad del vapor refrigerante [kg/m³]

$$f_2 = 1$$

Factor de aumento de la ebullición convectiva

$$F_{fl} = 1,63$$

Factor de asociación superficie-líquido, se encuentra en la tabla 2 del cap 5 del fundamentals Ashrae

$$Fr_l = \frac{G_e^2}{\rho_{l,e}^2 \cdot g \cdot d_{i,e}}$$

Numero de froude de la parte líquida

$$Bo = \frac{\dot{q}_e}{G_e \cdot h_{lv}} \quad \text{Numero de boiling}$$

$$h_{lv} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} \quad [R\$; T = T_e]$$

Entalpia de vaporización [J/kg]

$$\dot{q}_e = h_{refri,e} \cdot [T_{w,i,e} + T_e] \quad \text{Flujo de calor [W/m}^2\text{]}$$

$$T_{w,i,e} = 19$$

TRANSFERENCIA DE CALOR

CONDENSADOR DE REFRIGERANTE y EVAPORADOR DE AGUA

$$Q_{c,BC} = \frac{\Delta T_c}{R_c}$$

Calor por concepto de resistencia térmica

$$\Delta T_c = T_c - T_{\text{sat}} \quad \text{La diferencia de temperatura es cte}$$

$$R_c = \frac{1}{U_{i,c} \cdot A_{i,c}}$$

Resistencia térmica del condensador de refrigerante y evaporador de agua

$$R_c = \frac{1}{U_{o,c} \cdot A_{o,c}}$$

$$R_c = R_{c,refri} + R_{c,pared} + R_{c,agua}$$

Suma de resistencias en el condensador de refrigerante y evaporador de agua

$$d_{i,c} = 0,010922$$

Diametro interno del tubo de cobre 1/2" segun el catalogo de nacobre [m]

$$d_{o,c} = 0,0127$$

Diametro externo del tubo de cobre 1/2" segun el catalogo de nacobre [m]

$$N_{t,c} = 41 \quad \text{Numero de tubos en el evaporador de agua}$$

Resistencia del refrigerante en el condensador de refrigerante y evaporador de agua

$$Rc_{refri} = \frac{1}{h_{refri,c} \cdot A_{i,c}}$$

$$A_{i,c} = \pi \cdot d_{i,c} \cdot L_c \cdot N_{t,c} \quad \text{Area superficial interna de los tubos [m}^2\text{]}$$

$$Tw_{i,c} = 51 \quad ^\circ\text{C: Temperatura superficial interna en los tubos del evaporador de agua}$$

$$h_{refri,c} = 0,0077 \cdot \left[\frac{k_{l,r,c}^3 \cdot \rho_{l,r,c} \cdot (\rho_{l,r,c} - \rho_{v,r,c}) \cdot gr}{\mu_{l,r,c}^2} \right]^{1/3} \cdot Re_{l,r,c}^{0,4}$$

Correlacion de Mcadams tabla 3 cap 5 fundamentals ashrae para superficies verticales en flujo turbulento

$$h_{fig,r} = \text{Enthalpy}_{\text{vaporization}} \left[\text{R\$} ; T = \frac{T_3 + T_4}{2} \right]$$

Entalpia de vaporizacion del refrigerante [J/kg]

$$\rho_{l,r,c} = \rho \left[\text{R\$} ; T = \frac{T_3 + T_4}{2}; x = 0 \right]$$

Densidad del refrigerante liquido [kg/m³]

$$\rho_{v,r,c} = \rho \left[\text{R\$} ; T = \frac{T_3 + T_4}{2}; x = 1 \right]$$

Densidad del vapor refrigerante [kg/m³]

$$k_{l,r,c} = k \left[\text{R\$} ; T = \frac{T_3 + T_4}{2}; x = 0 \right]$$

Conductividad del refrigerante liquido [W/m°C]*

$$Re_{l,r,c} = \frac{G_c \cdot d_{i,c}}{\mu_{l,r,c}}$$

$$G_c = \frac{4 \cdot m_r}{\pi \cdot d_{i,c}^2} \text{ Gasto [Kg/m}^2\text{*s]}$$

$$\mu_{r,c} = \text{Visc} \left[\text{R\$; } T = \frac{T_3 + T_4}{2}; x = 0 \right]$$

*Viscosidad dinamica del refrigerante liquido [kg/m*s]*

$$Pr_{r,c} = Pr \left[\text{R\$; } T = \frac{T_3 + T_4}{2}; x = 0 \right] \text{ Numero de Prandtl}$$

Resistencia de los tubos de cobre en el condensador de refrigerante y evaporador de agua

$$R_{c_{pared}} = \frac{\ln \left[\frac{d_{o,c}}{d_{i,c}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot K_{c,e} \cdot L_c \cdot N_{t,c}}$$

Resistencia del agua en el condensador de refrigerante y evaporador de agua

$$R_{c_{agua}} = \frac{1}{h_{agua,c} \cdot A_{o,c}}$$

$$A_{o,c} = \pi \cdot d_{o,c} \cdot L_c \cdot N_{t,c}$$

Area superficial exterior de los tubos en contacto con el agua [m²]

$$\dot{q}_c = h_{agua,c} \cdot \Delta T_{exc} \text{ Flujo de calor [W/m}^2\text{]}$$

$$\Delta T_{exc} = T_{W_{o,c}} - T_{sat} \text{ Diferencia de temperatura de exceso}$$

$$\Delta T_{exc} = 5 \text{ Existe el rango de 5 a 10}$$

$$\frac{C_{p_{l,w,c}} \cdot [T_{W_{o,c}} - T_{sat}]}{C_{sf} \cdot H_{fg,w} \cdot Pr_{l,w,c}^n} = \left[\frac{\dot{q}_c}{\mu_{l,w,c} \cdot H_{fg,w}} \cdot \left(\frac{\sigma}{gr \cdot [\rho_{l,w,c} - \rho_{v,w,c}]} \right)^{0,5} \right]^{0,33}$$

Ec 10.2 cengel, donde sigma sale de la tabla 10,1 C_{sf} y n salen de la tabla 10,3 de la cengel

$$T_{prom_c} = \frac{T_{sat} + T_{W_{o,c}}}{2}$$

$$\mu_{l,w,c} = \text{Visc} [\text{water ; } T = T_{prom_c}; x = 0]$$

*Viscosidad dinamica del agua liquida [Kg/m*s]*

$$\rho_{lw,c} = \rho [\text{water} ; T = T_{prom,c} ; x = 0]$$

Densidad del agua en estado liquido a la temperatura prom [kg/m³]

$$\rho_{vw,c} = \rho [\text{water} ; T = T_{sat} ; x = 1]$$

Densidad del vapor de agua a la temperatura prom [kg/m³]

$$\sigma = 0,0696$$

Tabla 10,1 - Tension superficial de la interfaz liquido-vapor para el agua a una T=40°C

$$Cp_{lw,c} = Cp [\text{water} ; T = T_{prom,c} ; x = 0]$$

Calor especifico del agua liquida [J/kg°C]*

$$C_{sf} = 0,013$$

Tabla 10,3 - combinacion del fluido - superficie de calentamiento: agua-cobre (pulido)

$$Pr_{lw,c} = Pr [\text{water} ; T = T_{prom,c} ; x = 0] \quad \text{Numero de Prandtl}$$

$$n = 1 \quad \text{Tabla 10,3}$$

CALCULOS EXTERNOS

CONDENSADOR DE AGUA (evaporador refrigerante)

$$d_{i,e} = d_{o,e} - 2 \cdot Ltw_e$$

Ecuación para hallar el espesor del tubo de cobre

$$\frac{Ltp_e}{d_{o,e}} = 1,38$$

Relación para conocer el paso de disposición de los tubos

$$\theta_{tp,e} = 90$$

Angulo de disposición geométrica de los tubos

$$L_{to_e} = L_e + 2 \cdot L_{ts_e} \quad \text{Longitud nominal de los tubos}$$

$$L_{ts_e} = 0,5 \cdot D_{s_e} \cdot \sqrt{\frac{P_{sat}}{\sigma_{ts}}} \quad \text{Espesor de la placa de tubos}$$

$$\sigma_{ts} = 5,2 \times 10^8$$

Resistencia ultima a la traccion del acero inoxidable

$$D_{otl_e} = D_{s_e} - L_{bb_e}$$

Diámetro del círculo circunscrito del campo del haz de tubos

$$D_{ctl_e} = D_{otl_e} - d_{o,e}$$

Diámetro del círculo a través de los centros de las filas externas del tubo

$$N_{t,e} = \frac{0,78 \cdot D_{ctl_e}^2}{C_r \cdot L_{tp_e}^2}$$

Numero de tubos en el condensador de agua

$$C_r = 1$$

Constante que depende de la disposición de los tubos

$$\frac{D_{s_e}}{d_{o,e}} = 15$$

$$\rho_s = \rho [\text{water ; } P = 9590 ; T = 45]$$

$$V_{ns_{max,e}} = \sqrt{\frac{750}{\rho_s}}$$

Velocidad máxima del vapor en la entrada del condensador de agua

$$D_{ns_{min,e}} = \sqrt{\frac{mv}{\frac{\pi}{4} \cdot \rho_s \cdot V_{ns_{max,e}}}}$$

Diámetro mínimo de la boquilla de entrada del vapor

$$Lns_e = 0,25 \cdot Dns_{min,e}$$

Distancia para que el area de flujo de escape sea igual al area de la boquilla

EVAPORADOR DE AGUA (condensador refrigerante)

$$d_{i,c} = d_{o,c} - 2 \cdot Ltw_c$$

Ecuación para hallar el espesor del tubo de cobre

$$\frac{Ltp_c}{d_{o,c}} = 1,38$$

Relación para conocer el paso de disposición de los tubos

$$\theta_{tp,c} = 45$$

Angulo de disposición geométrica de los tubos

$$Lto_c = L_c + 2 \cdot Lts_c \quad \text{Longitud nominal de los tubos}$$

$$Lts_c = 0,5 \cdot Ds_c \cdot \sqrt{\frac{P_{sat}}{\sigma_{ts}}} \quad \text{Espesor de la placa de tubos}$$

$$Dotl_c = Ds_c - Lbb_c$$

Diámetro del círculo circunscrito del campo del haz de tubos

$$Dctl_c = Dotl_c - d_{o,c}$$

Diámetro del círculo a través de los centros de las filas externas del tubo

$$N_{t,c} = \frac{0,78 \cdot Dctl_c^2}{Cr \cdot Ltp_c^2}$$

Numero de tubos en el evaporador de agua

$$\frac{Ds_c}{d_{o,c}} = 15$$

$$Vns_{max,c} = \sqrt{\frac{750}{\rho_s}}$$

Velocidad máxima del vapor en la entrada del condensador de agua

$$D_{ns_{min;c}} = \sqrt{\frac{mv}{\frac{\pi}{4} \cdot \rho_s \cdot V_{ns_{max;c}}}}$$

Diámetro mínimo de la boquilla de entrada del vapor

$$L_{ns_e} = 0,25 \cdot D_{ns_{min;c}}$$

Distancia para que el area de flujo de escape sea igual al area de la boquilla

SOLUTION

Unit Settings: SI C Pa J mass deg

$A_{i,c} = 0,774$
 $A_{o,c} = 0,9$
 $B_o = 0,00004197$
 $C_{p1} = 4183$
 $C_{plw,e} = 4183$
 $C_{sf} = 0,013$
 $D_{ctlc} = 0,09094$
 $\Delta T_e = 59,98$
 $\Delta T_{sobre} = 5$
 $D_{ns_{min;c}} = 0,000906$
 $D_{otlc} = 0,1398$
 $D_{sc} = 0,1905$
 $d_{i,c} = 0,01092$
 $d_{o,c} = 0,0127$
 $f = 0,01223$

$F_{r1} = 0,06405$
 $F_{r1} = 1,63$
 $G_c = 109,5$
 $h_1 = 119102$
 $h_{2,sat} = 243922$
 $h_{3,sat} = 276247$
 $h_5 = 119102$
 $h_{agua,e} = 5981$
 $h_{fg,e} = 2,469E+06$
 $H_{fg,w} = 2,384E+06$
 $h_{refri,c} = 1696$
 $h_w = 96457$
 $h_{w,1} = 2,589E+06$
 $K_{lr,c} = 0,06544$
 $K_{lw,e} = 0,6092$
 $L_{bbe} = 0,08686$

$A_{i,e} = 0,1896$
 $A_{o,e} = 0,2205$
COP = 3,022
 $C_{plw,c} = 4182$
 $Cr = 1$
 $D_{ctlc} = 0,1271$
 $\Delta T_c = 3,77$
 $\Delta T_{exc} = 5$
 $\Delta T_{sub} = 5,565$
 $D_{ns_{min,e}} = 0,000906$
 $D_{otlc} = 0,1036$
 $D_{se} = 0,1905$
 $d_{i,e} = 0,01092$
 $d_{o,e} = 0,0127$
Factor de funcionamiento = 4,022

$f_2 = 1$
 $gr = 9,81$
 $G_e = 109,5$
 $h_2 = 248166$
 $h_3 = 290869$
 $h_4 = 145616$
 $h_{agua,c} = 630,1$
 $h_f = 125,9$
 $h_{f,r} = 140733$
 $h_{iv} = 206660$
 $h_{refri,e} = 118,5$
 $h_{w,0} = 205145$
 $K_{c,e} = 300$
 $K_{lr,e} = 0,09818$
 $L_{bbe} = 0,05073$
 $L_{nsc} = 0,0002265$

$L_{nse} = 0,0002265$
 $L_{toe} = 0,2641$
 $L_{tpe} = 0,01753$
 $L_{tse} = 0,0004527$
 $L_{twe} = 0,000889$
 $L_e = 0,2632$
 $\mu_{lr,c} = 0,0001257$
 $\mu_{lw,c} = 0,0005336$
 $\mu_{vw,c} = 0,00001013$
 $mw = 0,001528$
 $N_{t,c} = 41$
 $N_{t,fil} = 4,2$
 $P_{lr,e} = 3,982$
 $P_{atm,bga} = 90660$
 $P_e = 193089$
 $P_{vacio} = 78915$
 $Q_{caux} = 272,1$
 $Q_{clat} = 1325$
 $Q_{evlat} = 1325$
 $Q_{rsen} = 150,1$
 $\dot{q}_e = 950,2$
 $R\$ = 'R134a'$
 $R_{cpared} = 0,000003547$
 $R_{eagua} = 0,0007583$
 $R_{elr,e} = 2439$
 $R_{erefri} = 0,04451$
 $\rho_{lr,e} = 1322$
 $\rho_{lw,e} = 994,3$
 $\rho_{vr,c} = 84,57$
 $\rho_{vw,c} = 0,07928$
 $R_c = 0,002529$

 $\sigma = 0,0696$
 $s_1 = 462,3$
 $s_3 = 954,4$
 $s_5 = 428$
 $s_{w,0} = 690,8$
 $T_6 = 23$
 $T_8 = 23$
 $\theta_{tp,e} = 90$
 $T_{wi,c} = 51$

$L_{toc} = 0,5511$
 $L_{tpc} = 0,01753$
 $L_{tsc} = 0,0004527$
 $L_{twc} = 0,000889$
 $L_c = 0,5502$
 $mr = 0,01026$
 $\mu_{lr,e} = 0,0002963$
 $\mu_{lw,e} = 0,0007334$
 $mv = 0,0005556$
 $n = 1$
 $N_{t,e} = 21$
 $P_{lr,c} = 3,163$
 $P_{lw,c} = 3,53$
 $P_c = 1,413E+06$
 $P_{sat} = 11745$
 $Q_c = 1341$
 $Q_{cbc} = 1491$
 $Q_{evbc} = 1325$
 $Q_{evsen} = 166,2$
 $\dot{q}_c = 3151$
 $Q_{sobre} = 43,55$
 $R_{cagua} = 0,001763$
 $R_{crefri} = 0,0007619$
 $R_{elr,c} = 9518$
 $R_{epared} = 0,00001448$
 $\rho_{lr,c} = 1059$
 $\rho_{lw,c} = 987,3$
 $\rho_s = 990,2$
 $\rho_{vr,e} = 10,64$
 $\rho_{vw,e} = 0,07928$
 $R_e = 0,04528$

 $\sigma_{ts} = 5,200E+08$
 $s_2 = 954,4$
 $s_4 = 509,5$
 $s_w = 338,8$
 $s_{w,1} = 8092$
 $T_7 = 49$
 $\theta_{tp,c} = 45$
 $T_{promc} = 51,5$
 $T_{wi,e} = 19$

$T_{wo,c} = 54$
 $T_1 = -10,98$
 $T_3 = 64,8$
 $T_5 = 47,21$
 $T_e = -10,98$
 $T_{prom,e} = 34,06$
 $T_{sobre} = -5,98$
 $U_{ie} = 116,5$
 $U_{oe} = 100,1$
 $V_{nsmax,e} = 0,8703$
 $x_4 = 0,12$

$T_{wo,e} = 19,11$
 $T_2 = -5,98$
 $T_4 = 52,77$
 $T_c = 52,77$
 $T_{prom,Cp1} = 36$
 $T_{sat} = 49$
 $U_{ic} = 510,9$
 $U_{oc} = 439,4$
 $V_{nsmax,c} = 0,8703$
 $W_c = 438,3$
 $x_{in} = 0,396$


ANEXO D. CATÁLOGOS.

Catálogo tubería de cobre



Transformamos el valor del cobre en tu vida

CÁLOGO NACOBRE

 @nacionaldecobre

 /nacobre



TUBERÍA FLEXIBLE

Tipo	Diámetro		Longitud de Rollo	Usos y Aplicaciones
	Nominal	Exterior		
L	1/4" 3/8" 1/2" 3/4" 1"	3/8" 1/2" 5/8" 7/8" 1 1/8"	18.30 m	<ul style="list-style-type: none"> • Tomas domiciliarias de agua potable, gas L.P. y natural • Aire acondicionado • Refrigeración
GAS, USOS GENERALES Y AUTOMOTRICES	1/8" 3/16" 1/4" 5/16" 3/8" 1/2" 5/8" 3/4"	1/8" 3/16" 1/4" 5/16" 3/8" 1/2" 5/8" 3/4"	15.24 m	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de gas L.P., y natural • Redes de agua fría y caliente • Fluidos automotrices
REFRIGERACIÓN	1/8" 3/16" 1/4" 5/16" 3/8" 1/2" 5/8" 3/4"	1/8" 3/16" 1/4" 5/16" 3/8" 1/2" 5/8" 3/4"	15.24 m	<ul style="list-style-type: none"> • Instalaciones de gas L.P., y natural • Aire acondicionado • Refrigeración (Tubería con puntas selladas y deshidratada)



Flexible L

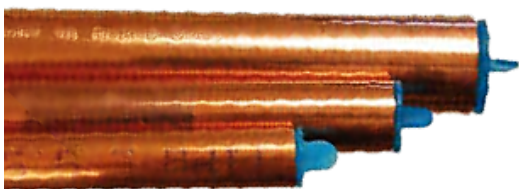
Medida Nominal	Diámetro Exterior	Espesor de Pared	Peso por Rollo
1/4" 6.35 mm	0.375" 9.525 mm	0.030" 0.762 mm	7.575 lb 3.439 kg
3/8" 9.5 mm	0.500" 12.700 mm	0.035" 0.889 mm	11.907 lb 5.406 kg
1/2" 12.7 mm	0.625" 15.875 mm	0.040" 1.016 mm	17.127 lb 7.776 kg
5/8" 15.785 mm	0.750" 19.050 mm	0.042" 1.067 mm	21.760 lb 9.879 kg
3/4" 19 mm	0.875" 22.225 mm	0.045" 1.143 mm	27.337 lb 12.411 kg
1" 25 mm	1.125" 28.575 mm	0.050" 1.270 mm	39.341 lb 17.861 kg

Usos Generales y Refrigeración

Medida Nominal	Diámetro Exterior	Espesor de Pared	Peso por Rollo
1/8" 3.175 mm	0.125" 3.175 mm	0.030" 0.762 mm	1.735 lb 0.788 kg
3/16" 4.762 mm	0.187" 4.762 mm	0.030" 0.762 mm	2.870 lb 1.303 kg
1/4" 6.350 mm	0.250" 6.350 mm	0.030" 0.762 mm	4.022 lb 1.826 kg
5/16" 7.937 mm	0.312" 7.937 mm	0.032" 0.813 mm	5.460 lb 2.479 kg
3/8" 9.525 mm	0.375" 9.525 mm	0.032" 0.813 mm	6.665 lb 3.023 kg
1/2" 12.700 mm	0.500" 12.700 mm	0.032" 0.813 mm	9.094 lb 4.125 kg
5/8" 15.875 mm	0.625" 15.875 mm	0.035" 0.889 mm	12.586 lb 5.714 kg
3/4" 19.000 mm	0.750" 19.000 mm	0.035" 0.889 mm	15.240 lb 6.924 kg

Tuberías	Norma NMX	Norma ASTM
M, L y K	W-018	B-88
L Flexibles Gas	W-018	B-88
Usos Generales y Automotrices	W-018	B-88
Refrigeración	W-023	B-280

TUBERÍA PARA REFRIGERACIÓN



DENOMINACIÓN NACOBRE: 122
DESIGNACIÓN: COBRE DESOXIDADO
CON FÓSFORO
ALTO FÓSFORO RESIDUAL (DHP)

El cobre Nacobre desoxidado con alto fósforo residual es un cobre puro electrolíticamente refinado, desoxidado con fósforo. Los tubos de cobre desoxidados con fósforo durante años han sido amplia y satisfactoriamente usados en intercambiadores de calor, condensadores y evaporadores. También son utilizados en calderas y auxiliares similares en plantas de energía y en equipos de aire acondicionado. Los tubos de cobre fosforado tienen aplicación en ingenios y refinerías. Los tubos de cobre Nacobre tienen la más alta conductividad térmica que cualquiera de los tubos para intercambiadores de calor estándar y son por lo tanto adecuados para muchos propósitos industriales donde estas propiedades de alta resistencia a la corrosión, son deseables.

DIMENSIONES DISPONIBLES MEDIDAS ESTÁNDAR EN ROLLOS Y TRAMO RECTO

MEDIDA NOMINAL															
1/4	5/16	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1 1/8	1 3/8	1 5/8	2 1/8	2 5/8	3 1/8	3 5/8	4 1/8	
DIÁMETRO EXTERIOR															
0.250	0.312	0.375	0.500	0.625	0.750	0.875	1.125	1.375	1.625	2.125	2.625	3.125	3.625	4.125	
PARED (TRAMO)			0.030	0.035	0.040	0.042	0.045	0.050	0.055	0.060	0.070	0.080	0.090	0.100	0.110
PARED (ROLLOS)	0.030	0.032	0.032	0.032	0.035	0.042	0.045	Fuera de esta área favor de verificar con la planta							

DIÁMETRO EXTERIOR (Pulg)	MEDIDAS NO ESTÁNDAR EN ROLLOS				
0.875					
0.750					
0.625					
0.500					
0.375					
0.250					
	0.024	0.026	0.028	0.049	0.065

ESPESOR DE PARED (Pulg)

Tramos: las medidas estándar en tramo recto son fabricadas en longitudes de 20 Ft y los rollos en 50 ft. Las medidas no estándar en rollos son fabricadas en longitudes de 50 - 150 ft. Si se requiere otra longitud, deberá existir un acuerdo entre cliente-proveedor.

COMPOSICIÓN QUÍMICA

Aleación	Cu (%)	P
C12200	99.9	0.015 - 0.040

PROPIEDADES MECÁNICAS

Aleación	Temple	Tensión (kst)	Expansión	Elongación	Tamaño de Grano (mm)
C12200	Tramo recto	H58	H58	36 Min	N/A
C12200	Rollo	050	050	30 Min	40% Min.
C12200	Rollo	060	060	30 Min	40% Min.

Nota: Las medidas estándar son fabricadas en temple H58 y O60.



PROPIEDADES FÍSICAS	UNIDADES	C12200
PUNTO DE FUSIÓN (LÍQUIDOS)	°F (°C)	1981 (1083)
PUNTO DE FUSIÓN (SÓLIDOS)	°F (°C)	
DENSIDAD (A 20°C)	Lb/cu, in	0.323
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA	per °F from 68 to 572	9.8 x 10 -6
CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	Btu/sq.ft/hr/°F to 68°F	196
RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (RECOCIDO)	Ohms (circ.mil./ft) to 68°F	12.2
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (RECOCIDO)	%IACS to 68°F	85
CAPACIDAD TÉRMICA (CALOR ESPECÍFICO)	Btu/lb/°F to 68°F	0.09
MÓDULO DE ELASTICIDAD (TENSIÓN)	ksi	17000
MÓDULO DE RIGIDEZ	ksi	6400
TEMPERATURA DE RECOCIDO	°F - °C	700 - 1200 - 375 - 650

ADAPTABILIDAD CON DIFERENTES TIPOS DE SOLDADURA

	Blanca	Amarilla	con Oxiacetileno	de Arco con Carbono	de Arco en Gas Inerte	de Arco con Rec.de Metal
Al						
C12200	Excelente	Excelente	Buena	Buena	Excelente	No recomendada

RESISTENCIA AL TIPO DE SOLDADURA

Punteo	Costura	A presión
No recomendada	Buena	No recomendada

EQUIVALENTES EN PULGADAS PARA VARIOS CALIBRES

Cal. No.	1	2	3	4	5	6	7	8
BWG	0.300	0.284	0.259	0.238	0.220	0.203	0.180	0.165
AWG	0.2893	0.2576	0.2294	0.2043	0.1819	0.6120	0.1443	0.1285
Cal. No.	9	10	11	12	13	14	15	16
BWG	0.148	0.134	0.120	0.109	0.095	0.083	0.072	0.065
AWG	0.1144	0.1019	0.0907	0.0808	0.0720	0.0641	0.0571	0.0508
Cal. No.	17	18	19	20	21	22	23	24
BWG	0.058	0.049	0.042	0.035	0.032	0.028	0.025	0.022
AWG	0.0453	0.0403	0.0359	0.0320	0.0285	0.0253	0.0226	0.0201

NORMAS APLICABLES

ASTM
ASME
BRITISH STANDARD
DIN
JIS
MIL
NFA
ISO

PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS DISPONIBLES

CORRIENTES
CIRCULANTES
HIDROSTÁTICA
NEUMÁTICA

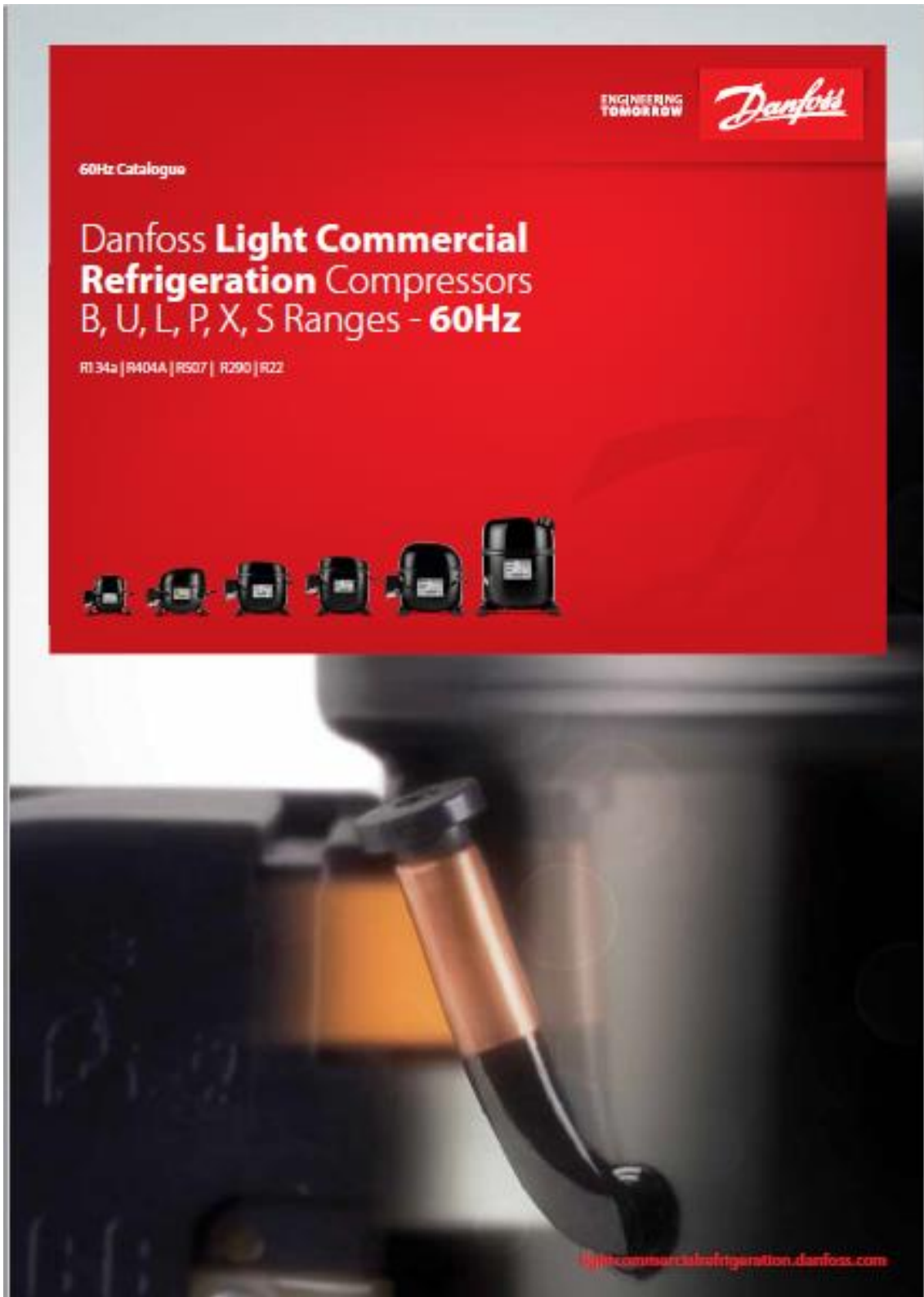
PESO POR PIE

W = PESO POR PIE (Lb/Ft)
D= DIÁMETRO EXTERIOR (in)
P= ESPESOR DE PARED (in)
W= (D-P)*P*12.18

PRESIÓN MÁXIMA DE TRABAJO

Nota: La presión de ruptura es el valor de 5 veces la presión de trabajo.

P = Presión máxima de trabajo (psi)
S = Tensión mínima de un material para un temple específico (Es el valor de la tensión en psi en la Tabla de Propiedades Mecánicas)
D = Diámetro exterior del tubo
T = Espesor de pared del tubo
$$P = \frac{2T \times S}{5D}$$



Danfoss Light Commercial Refrigeration Compressors

R134a (*) LBP | LMBP

COMPRESSOR MODEL	DANFOSS CODE (#)	DISPLACEMENT cm ³	POWER hp	MOTOR TYPE	VOLTAGE FREQUENCY	APPLICATION	COMPRESSOR COOLING	REFRIGERATION CAPACITY								WEIGHT lbs	DESIGN
								ASHRAE conditions Condensing temperature = 131°F (55°C)									
								-22°F (-30°C)		-10°F (-23.3°C)			+14°F (-10°C)				
								Btu/h	W	Cooling Capacity Btu/h	W	COP	EER	Btu/Wh	Btu/h		
L22H5	123B8107	2.20	1/20	RSIR	110-120V 60Hz	LBP	Static	113	33	181	53	0.75	2.55	396	116	7.9	Lb
L30H5L	123B8108	3.1	1/12	RSIR	110-120V 60Hz	LBP	Static	164	48	266	78	0.95	3.24	580	170	8.6	Lc
B38H5	123B8110	3.80	1/12	RSIR	110-115V 60Hz	LBP	Static	203	59	329	96	1.11	3.78	720	211	11.0	Bc
B38H5L	123B8111	3.80	1/7	RSIR	110-120V 60Hz	LBP	Static	220	64	329	96	1.06	3.62	563	165	11.0	Bc
B43H5L	123B8114	4.30	1/10	RSIR	110-120V 60Hz	LBP	Static	236	69	377	110	1.05	3.77	786	230	11.0	Bc
GL45ADa	123B1153	4.56	1/8	RSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	274	80	418	123	0.98	3.35	257	186	18.5	Lb
GL45ADb	123B1154	4.56	1/8	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	274	80	418	123	0.98	3.35	257	186	18.5	Lb
GL60ADa	123B1155	5.98	1/6	RSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	398	117	615	180	1.1	3.75	1222	358	20.9	Lb
GL60ADb	123B1156	5.98	1/6	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	398	117	615	180	1.1	3.75	1222	358	20.9	Lb
✓ GUY60NRb	123B1301	6.00	1/5	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Fan	481	141	738	216	1.44	4.90	1489	436	19.8	Ub
✓ GUY60NRc	123B1308	6.00	1/5	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Static	481	141	738	216	1.44	4.90	1489	436	19.8	Ub
✓ GUY70NRb	123B1307	6.70	1/5	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Fan	507	149	786	230	1.50	5.10	1626	477	20.5	Ub
✓ GUY70NRc	123B1309	6.70	1/5	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Static	507	149	786	230	1.50	5.10	1626	477	20.5	Ub
GL80ADa	123B1157	8.10	1/5	RSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	481	141	762	223	1.07	3.64	1571	460	21.6	Lc
GL80ADb	123B1158	8.10	1/5	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	481	141	762	223	1.07	3.64	1571	460	21.6	Lc
✓ GUY80NRb	123B1303	8.10	1/4	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Fan	580	170	905	265	1.45	4.94	1873	549	21.2	Ub
✓ GUY80NRc	123B1310	8.10	1/4	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Static	580	170	905	265	1.45	4.94	1873	549	21.2	Ub
GL90ADa	123B1159	9.09	1/4	RSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	580	170	889	261	1.14	3.9	1770	519	24.5	Ld
GL90ADb	123B1160	9.09	1/4	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	580	170	889	261	1.14	3.9	1770	519	24.5	Ld
GL99ADa	123B1161	9.95	1/4	RSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	622	182	952	279	1.15	3.92	1849	542	25.2	Ld
GL99ADb	123B1162	9.95	1/4	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Static	622	182	952	279	1.15	3.92	1849	542	25.2	Ld
✓ GLY12NRa	123B1304	10.70	3/8	CSIR	115-127V 60Hz	LMBP	Fan	705	207	1091	320	1.33	4.53	2234	655	24.7	Ld
✓ GLY12NRb	123B1305	10.70	3/8	CSR	115-127V 60Hz	LMBP	Fan	705	207	1091	320	1.39	4.74	2234	655	24.7	Ld
GP14FE	123B1163	14.17	3/8	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Fan	778	228	1249	366	0.94	3.21	2508	735	25.4	Pd
✓ GPY14NDa	123B1311	14.32	3/8	CSIR	115V 60 Hz	LMBP	Fan	925	271	1484	435	1.17	4.00	2979	873	26.9	Pd
✓ GPY14NDb	123B1312	14.32	3/8	CSR	115V 60 Hz	LMBP	Fan	925	271	1484	435	1.25	4.27	2979	873	26.9	Pd
GP16FE	123B1164	16.15	3/8	CSIR	115V 60 Hz	LBP	Fan	877	257	1433	420	1.00	3.42	2829	829	28.4	Pd
L30HL	123B8102	3.00	1/12	RSIR	220-240V 60Hz	LBP	Static	157	46	252	74	1.04	3.54	553	162	9.3	Lc
B38H	123B8109	3.80	1/7	RSIR	220-240V 60Hz	LBP	Static	203	59	329	96	1.11	3.78	720	211	10.1	Bb
B43H	123B8104	4.30	1/7	RSIR	220-240V 60Hz	LBP	Static	236	69	377	110	1.11	3.77	786	230	11.9	Bc
✓ B43HB	123B8105	4.30	1/10	RSCR	220-240V 60Hz	LBP	Static	236	69	377	110	1.3	3.77	786	230	11.5	Bc
GL45ANa	123B1113	4.56	1/8	RSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	274	80	433	127	1.09	3.73	897	263	18.5	Lb
GL60ANa	123B1118	5.98	1/6	RSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	452	133	604	177	1.15	3.91	1198	351	20.1	Lc
GL60ANb	123B1119	5.98	1/6	CSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Fan	452	133	604	177	1.15	3.91	1198	351	20.1	Lc
GL60ANc	123B1120	5.98	1/6	CSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	452	133	604	177	1.15	3.91	1198	351	20.1	Lc
GL70ANa	123B1173	6.65	1/5	RSIR	208-230V 60Hz	LBP	Static	464	136	694	203	1.17	3.99	1361	399	20.9	Lc
GL80ANa	123B1125	8.10	1/5	RSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	520	152	826	242	1.19	4.07	1619	475	21.6	Ld
GL80ANb	123B1126	8.10	1/5	CSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Fan	520	152	826	242	1.19	4.07	1619	475	21.6	Ld
GL80ANc	123B1127	8.10	1/5	CSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	520	152	826	242	1.19	4.07	1619	475	21.6	Ld
GL90ANa	123B1132	9.09	1/4	RISR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	564	165	863	253	1.20	4.10	1774	520	22.9	Ld
GL90ANb	123B1133	9.09	1/4	CSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Fan	564	165	863	253	1.20	4.10	1774	520	22.9	Ld
GL90ANc	123B1134	9.09	1/4	CSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Static	564	165	863	253	1.20	4.10	1774	520	22.9	Ld
GP14CG	123B1142	14.17	3/8	RSIR	208-230V 60 Hz	LBP	Fan	758	222	1231	361	1.18	4.03	2480	727	25.4	Pc
✓ GPY14NGa	123B1313	14.32	3/8	CSIR	220-230V 60Hz	LMBP	Fan	1017	298	1527	448	1.26	4.29	3095	907	27.3	Pd
✓ GPY14NGb	123B1314	14.32	3/8	CSR	220-230V 60Hz	LMBP	Fan	1017	298	1547	453	1.33	4.55	3095	907	27.3	Pd

✓ Green Cooling Models

(*) Or HFO-1234yf. Can be used with R513A and R450A

(#) Ordering code for single compressors. For pallet packed compressors, please use 123F instead of 123B

Danfoss Light Commercial Refrigeration Compressors

R134a (*) HBP | HMBP

COMPRESSOR MODEL	DANFOSS CODE (a)	POWER		MOTOR TYPE	VOLTAGE FREQUENCY	APPLICATION	COMPRESSOR COOLING	REFRIGERATION CAPACITY												WEIGHT lbs	DESIGN
		cm ³	hp					ASHRAE conditions Condensing temperature = 131°F (55°C)													
								+20°F (-6.7°C)						+45°F (+7.2°C)							
								+14°F (-10°C)		Cooling Capacity	COP	EER	Cooling Capacity		COP	EER					
								Btu/h	W				Btu/h	W			W/W	Btu/Wh	Btu/h		
B22G5	123B8116	2.20	1/16	RSIR	110-115V 60Hz	HBP	S / F	352	103	416	122	1.49	5.07	771	226	2.13	7.27	10.6	Bb		
B25G5L	123B8119	2.60	1/14	CSIR	110-115V 60Hz	HBP	S / F	395	116	485	142	1.46	5.00	952	279	2.28	7.78	11.8	Be		
B30G5	123B8122	3.10	1/12	RSIR	110-115V 60Hz	HBP	S / F	496	145	587	172	1.45	4.93	1072	314	2.08	7.08	10.6	Bb		
B35G5	123B8124	3.50	1/10	CSIR	110-115V 60Hz	HBP	S / F	576	169	677	198	1.43	4.87	1250	366	2.12	7.22	10.8	Bb		
B38G5L	123B8126	3.80	1/8	CSIR	110-115V 60Hz	HBP	S / F	677	198	801	235	1.52	5.17	1440	422	2.13	7.26	12.1	Be		
GL45PE	123B1568	4.50	1/6	RSIR	115 V 60 Hz	HMBP	Fan	766	224	902	264	1.34	4.56	1634	479	1.84	6.29	18.5	Lb		
GL45TE	123B1569	4.50	1/6	CSIR	115 V 60 Hz	HMBP	Fan	766	224	902	264	1.34	4.56	1634	479	1.84	6.29	19.0	Lb		
GL60PE	123B1570	5.68	1/5	RSIR	115 V 60 Hz	HMBP	Fan	976	286	1151	337	1.46	4.98	2088	612	2.01	6.85	20.9	Lc		
GL60TE	123B1571	5.68	1/5	CSIR	115 V 60 Hz	HMBP	Fan	976	286	1151	337	1.46	4.98	2088	612	2.01	6.85	21.4	Lc		
GL80PE	123B1574	7.57	1/5	RSIR	115 V 60 Hz	HMBP	Fan	1230	361	1456	427	1.54	5.26	2648	776	2.04	6.97	20.9	Lc		
GL80TE	123B1575	7.57	1/5	CSIR	115 V 60 Hz	HMBP	Fan	1230	361	1456	427	1.54	5.26	2648	776	2.04	6.97	22.3	Lc		
GLY80RDa	123B1572	8.10	1/5	CSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	1468	430	1735	508	1.71	5.82	3177	931	2.34	7.99	23.4	Lc		
GLY80RDb	123B1573	8.10	1/5	CSR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	1468	430	1735	508	1.82	6.20	3177	931	2.51	8.57	23.4	Lc		
GL90MG	123B1707	8.85	1/4	CSIR	230V 60 Hz	HBP	Static	1468	430	1829	536	1.59	5.41	3177	931	2.12	7.22	23.8	Ld		
GL90PE	123B1578	8.85	1/4	RSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	1484	435	1749	513	1.53	5.22	3160	926	2.06	7.02	23.8	Ld		
GL90TE	123B1579	8.85	1/4	CSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	1484	435	1749	513	1.53	5.22	3160	926	2.06	7.02	23.8	Ld		
GLY90RDa	123B1576	9.09	1/4	CSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	1694	497	1991	584	1.68	5.72	3574	1047	2.25	7.68	23.4	Ld		
GLY90RDb	123B1577	9.09	1/4	CSR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	1694	497	1991	584	1.79	6.09	3574	1047	2.42	8.26	23.4	Ld		
GLY12RRa	123B1601	10.70	3/8	CSIR	115-127V 60Hz	HMBP	Fan	1964	576	2311	677	1.61	5.48	4143	1214	2.20	7.50	24.6	Ld		
GLY12RRb	123B1599	10.70	3/8	CSR	115-127V 60Hz	HMBP	Fan	1964	576	2311	677	1.71	5.82	4143	1214	2.32	7.92	24.6	Ld		
GPY12RDa	123B1580	12.10	3/8	CSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	2302	675	2681	786	1.68	5.73	4685	1373	2.25	7.68	27.1	Pd		
GPY12RDb	123B1581	12.10	3/8	CSR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	2302	675	2681	786	1.8	6.14	4685	1373	2.44	8.33	27.1	Pd		
GPY14RDa	123B1584	14.32	1/2	CSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	2657	779	1023	300	0.72	2.58	5824	1707	2.22	7.56	28.2	Pd		
GPY14RDb	123B1585	14.32	1/2	CSR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	2657	779	1023	300	0.76	1.60	5824	1707	2.36	8.07	28.2	Pd		
GP16TE	123B1718	16.15	3/8	CSIR	115V 60 Hz	HBP	Fan	2714	795	3196	937	1.44	4.91	5756	1687	1.96	6.69	28.4	Pd		
GPY16RDa	123B1588	16.15	1/2	CSIR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	2976	872	3486	1022	1.59	5.44	6202	1818	2.18	7.42	27.6	Pd		
GPY16RDb	123B1589	16.15	1/2	CSR	115V 60 Hz	HMBP	Fan	2976	872	3486	1022	1.7	5.78	6202	1818	2.31	7.90	27.6	Pd		
B25G	123B8117	2.6	1/14	RSIR	220-240V 50/60Hz	HBP	S / F	416	122	492	144	1.49	5.14	920	270	2.1	7.16	10.3	Bb		
B38G	123B8125	3.50	1/10	CSIR	220-240V 50/60Hz	HBP	S / F	685	123	786	230	1.72	5.87	1386	176	2.31	7.87	11.8	Bb		
GL45MG	123B1704	4.50	1/6	CSIR	230V 60 Hz	HBP	Static	766	224	951	279	1.41	4.83	1634	479	1.92	6.54	19.4	Lb		
GL45TG	123B1517	4.50	1/6	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	766	224	902	264	1.37	4.67	1634	479	1.92	6.54	19.0	Lb		
GL60MG	123B1705	5.68	1/5	CSIR	230V 60 Hz	HBP	Static	967	284	1148	336	1.46	4.97	2064	605	2.02	6.88	21.8	Lc		
GL60TG	123B1522	5.68	1/5	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	976	286	1151	337	1.49	5.07	2088	612	2.04	6.96	21.8	Lc		
GL80MG	123B1706	7.57	1/5	CSIR	230V 60 Hz	HBP	Static	1303	382	1575	462	1.57	5.34	2788	817	2.15	7.33	22.3	Lc		
GL80TG	123B1528	7.57	1/5	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	1230	361	1456	427	1.54	5.26	2648	776	2.04	6.97	22.3	Lc		
GL90TG	123B1534	8.85	1/4	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	1484	435	1749	513	1.49	5.08	3160	926	1.97	6.72	23.8	Ld		
GLY12RGa	123B1710	10.70	3/8	CSIR	220-230V 60Hz	HBP	Fan	1956	573	2291	671	1.6	5.45	4031	1181	2.00	6.82	24.7	Ld		
GLY12RGb	123B1711	10.70	3/8	CSR	220-230V 60Hz	HBP	Fan	1956	573	2291	671	1.75	5.97	4031	1181	2.24	7.64	24.7	Ld		
GP14TG	123B1539	14.17	3/8	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	2183	640	2596	761	1.53	5.21	4784	1402	2.03	6.93	28.4	Pd		
GP16TG	123B1714	16.15	3/8	CSIR	208-230V 60 Hz	HBP	Fan	2714	795	3196	937	1.52	5.20	5756	1687	2.00	6.81	28.4	Pd		
GPT16RG	123B1715	16.15	1/2	CSR	220-230V 60Hz	HBP	Fan	3036	890	3510	1029	1.73	5.91	6639	1946	2.17	8.09	27.6	Pd		
GPT18RG	123B1720	18.00	1/2	CSR	230V 60 Hz	HBP	Fan	3256	954	1710	501	1.63	5.55	6702	1964	2.2	7.5	28.3	Pd		
GX18TG	123B1545	18.40	1/2	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	3107	911	3671	1076	1.58	5.37	6643	1947	2.17	7.42	35.1	Xc		
GX23TG	123B1548	23.20	5/8	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	3889	1140	4584	1343	1.47	5.00	8260	2421	1.98	6.77	37.5	Xd		
GS26TG	123B1550	25.93	3/4	CSIR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	4325	1268	5241	1536	1.69	5.77	9926	2909	2.40	8.20	50.0	Sc		
GS30TG	123B1553	29.95	7/8	CSR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	4881	1430	5975	1751	1.78	6.08	11833	3468	2.61	8.90	50.7	Sd		
GS34TG	123B1614	34.42	1	CSR	220-230V 60Hz	HMBP	Fan	5069	1486	6957	2039	1.77	6.05	12407	3636	2.18	7.44	49.2	Sd		
GS34TF	123B1590	34.42	1	CSR	208-230V 60 Hz	HMBP	Fan	6310	1849	7510	2201	1.86	6.36	13580	3980	2.50	8.20	50.0	Sd		
GS26T3	123B1551	25.93	3/4	3PH	440V 60 Hz	HMBP	Fan	4325	1268	5241	1536	1.76	5.98	9926	2909	2.40	8.20	50.0	Sd		

Green Cooling Models
Or HFO-1234yf. Can be used with R513A and R450A
(a) Ordering code for single compressors. For pallet packed compressors, please use 123F instead of 123B

Catálogo válvula de expansión termostática

T2 / TE2 - Thermostatic Expansion Valves

Danfoss T2/TE2 brass body thermostatic expansion valves feature flare inlet and outlet connections. By pairing one valve body with one of eight replaceable orifices, a contractor can satisfy applications from -40°F to $+50^{\circ}\text{F}$ and from $\frac{1}{8}$ to $5\frac{3}{4}$ tons capacity (see capacity chart for specifics).



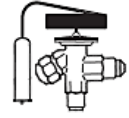
Facts

Applications:

- Traditional refrigeration
- Self-contained refrigerators
- Transport refrigeration
- Supermarket refrigeration
- Temperature range: -40°F to $+50^{\circ}\text{F}$
- Capacity range: $\frac{1}{8}$ to $5\frac{3}{4}$ tons (varies by refrigerant)
- Refrigerants: R-22, R-407C, R-134a, R-404A
- Functional valve consists of valve body and orifice
- Flare/solder adaptor available

Selection and Installation Instructions

- 1. Select Valve Body** Select the valve body based on refrigerant and need for internal or external equalization using the table on the next page under "Select Valve Body."

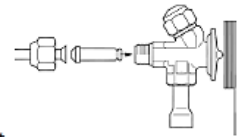


- 2. Select Orifice** T2/TE2 valve capacities are based on the installed orifice. To select the correct size orifice, use one of the two methods using the "Select Orifice" section on the following page.



3. Assemble Valve and Install into System

1. Slide the orifice into the valve body and secure using liquid line flare nut
2. Attach evaporator inlet or distributor assembly to valve outlet flare nut
3. Tighten both flare nuts
 - Specification for inlet is 26–33 ft.-lbs
 - Specification for outlet is 37–52 ft.-lbs
4. Secure sensing bulb with enclosed bulb strap to suction line. Bulb should be located between 1:00 and 4:00 on the tube, and the strap should be tight enough that no bulb movement is possible.
5. Wrap included insulation tape beginning one inch before the bulb and overlapping each wrap, finishing one inch beyond the bulb on the other end.



4. Adjust Superheat

1. Remove the cap
2. Make superheat adjustments ¼ turn at a time (¼ turn ≈ 1.75 °F).
 - Turning clockwise increases superheat.
 - Turning counter-clockwise decreases superheat.
3. Reinstall the cap



Easy to carry kits for truck stock

All T2/TE2 valve bodies and orifice featured on the next page and a hex key for superheat adjustment.

068Z7100

Both TUA/TUAE valve bodies and orifices and T2/TE2 and orifices plus gaskets for TUA/TUAE and a hex key for superheat adjustment.

068U7001

Kits are plastic cases with foam inserts, all valves and orifices, and instructions for selection and installation of the valves. Empty kits and foam available upon request.

Product Selection

1. Select Valve Body

Equalization	R-22	R-407C	R-404A	R-134a
Internal	068Z3206		068Z3400	068Z3346
External	068Z3209		068Z3403	068Z3348

All valves above have 3/8 in. x 1/2 in. flare connections and are designed for evaporator temperatures -40 °F to +50 °F (N charge). Other variations available, please contact your local Danfoss authorized wholesaler.

2. Select Orifice

T2/TE2 valve capacities are based on the installed orifice.

To select the correct size, use one of the two methods below:

A. System characteristics: Select the orifice using appropriate refrigerant, evaporator temperature, and system capacity.

OR

B. Nominal capacity of the installed valve: Use the nominal capacity of the originally installed valve and match with the nominal capacity in chart (3rd column from left).

Technical data and ordering

T2 and TE2 (IF EXACT CAPACITY CANNOT BE FOUND, USE NEXT LARGER ORIFICE)

R-22		R-407C	Evaporator temperature (°F)									
Orifice size	Danfoss Code No.	Nominal capacity of installed valve ¹ (tons)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
			Rated capacity ² (tons)									
0X	068-2002	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
00	068-2003	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
01	068-2010	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	068-2015	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
03	068-2006	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
04	068-2007	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2
05	068-2008	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
06	068-2009	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2

R-404A		Evaporator temperature (°F)										
Orifice size	Danfoss Code No.	Nominal capacity of installed valve ¹ (tons)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
			Rated capacity ² (tons)									
0X	068-2002	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
00	068-2003	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
01	068-2010	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	068-2015	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
03	068-2006	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
04	068-2007	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2
05	068-2008	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
06	068-2009	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2

R-134a		Evaporator temperature (°F)										
Orifice size	Danfoss Code No.	Nominal capacity of installed valve ¹ (tons)	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
			Rated capacity ² (tons)									
0X	068-2002	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4	1/4
00	068-2003	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
01	068-2010	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
02	068-2015	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2	1 1/2
03	068-2006	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2	2 1/2
04	068-2007	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2
05	068-2008	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
06	068-2009	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2	5 1/2

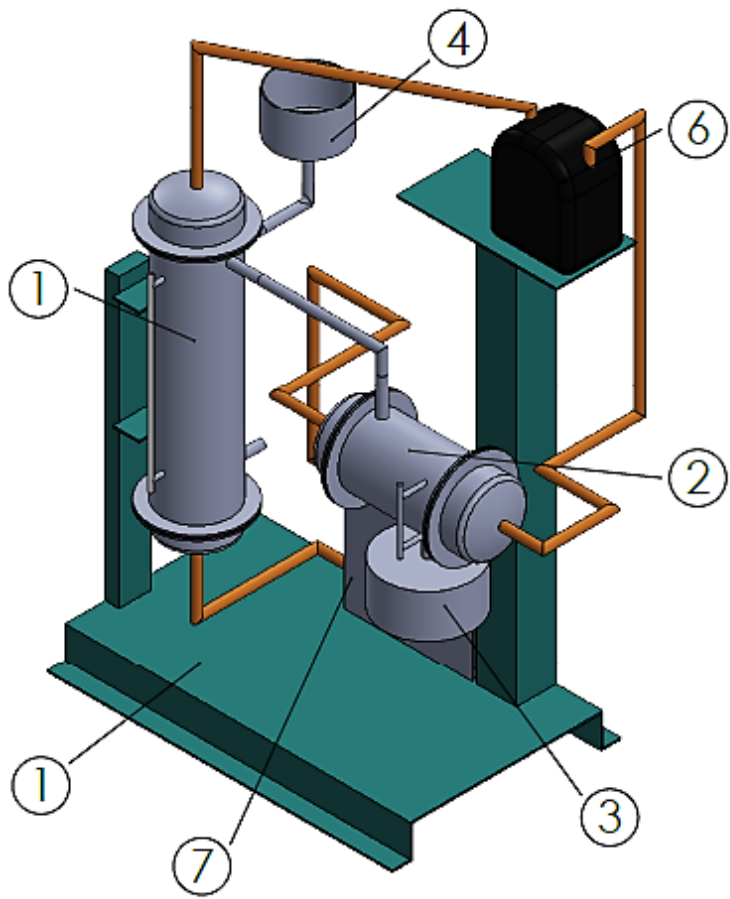
All capacity data is in accordance to ARI 750-2007.

¹ Nominal capacity based on condensing temperature of 100 °F, an evaporator temperature of 40 °F, liquid temperature of 98 °F ahead of the valve.

² Capacity based on condensing temperature of 95 °F and a vapor free liquid temperature of 88 °F ahead of the expansion valve.

Spare parts and accessories are available on page 56.

ANEXO E. PLANOS DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.



N° del elemento	Nombre de la pieza
1	Evaporador de agua
2	Condensador de agua
3	Tanque de condensado
4	Tanque de entrada
5	Estructura
6	Compresor
7	Condensador auxiliar



ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO

MATERIAL:
Acero inoxidable
y cobre



ESC
1:5

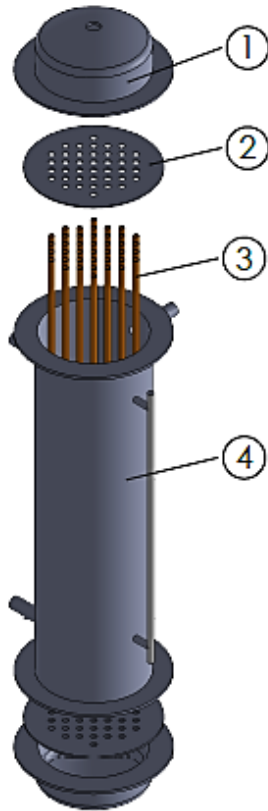
Cotas
en mm

Fecha:
10/10/2018

TOLERANCIAS
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

Dibujado por: Natalia Rueda Botia
Sandra Milena Aristizabal Gómez

01 - 00 - 00



N° DEL ELEMENTO	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	TAPA DE LOS INTERCAMBIADORES	TAPA DE ACERO INOXIDABLE DE 6" DE DIAMETRO	2
2	PLACA DE TUBOS VERTICALES	PLACA DE ACERO INOXIDABLE DE 3 mm DE ESPESOR CON 41 HUECOS	2
3	HAZ DE TUBOS VERTICALES	HAZ DE TUBOS VERTICALES DE COBRE DE 1/2"	1
4	CILINDRO VERTICAL	CILINDRO DE ACERO INOXIDABLE DE 6" DE DIAMETRO	1



ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

EVAPORADOR DE AGUA

MATERIAL:
Acero inoxidable
y cobre



ESC
1:2

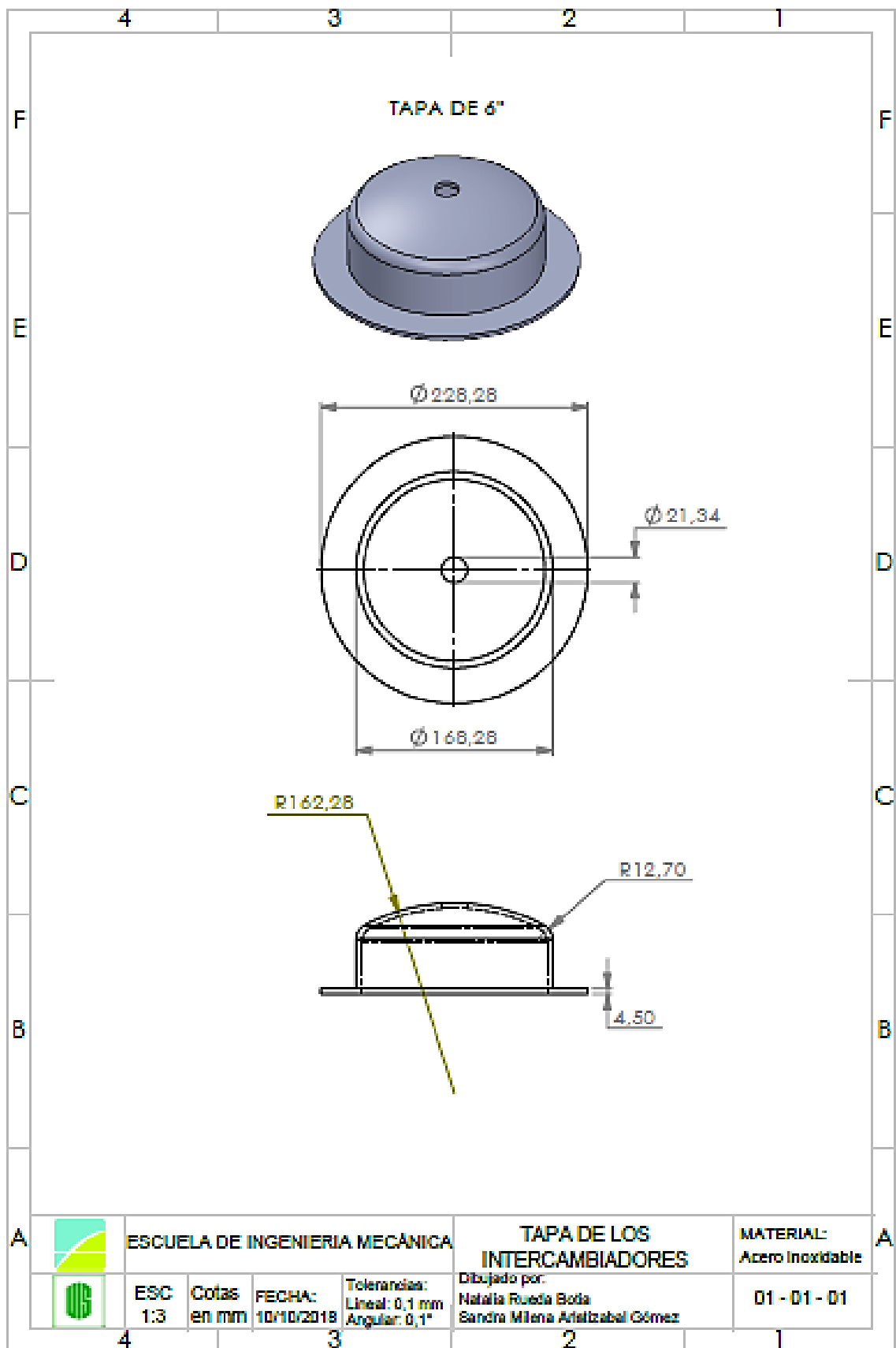
Cotas
en mm

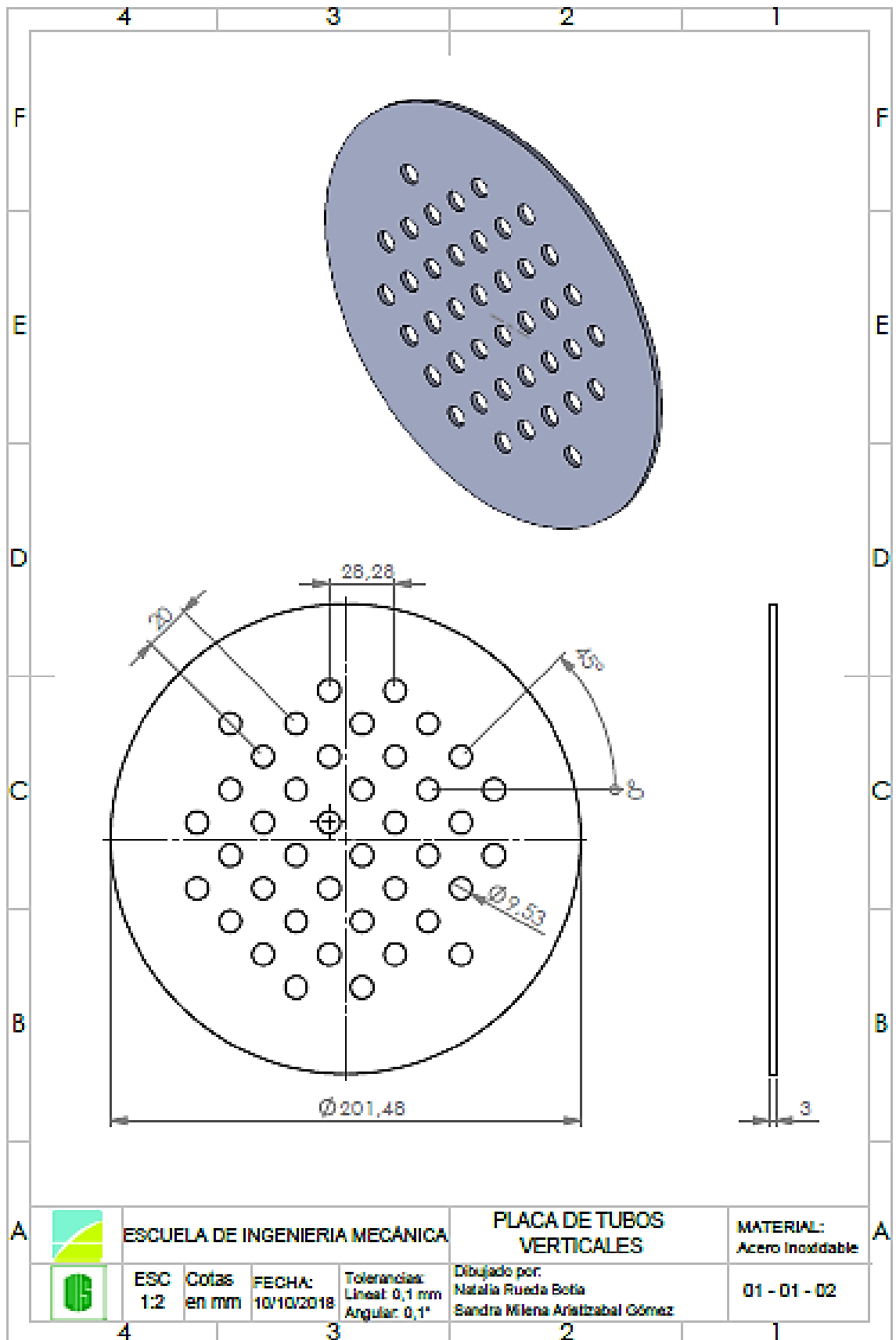
Fecha:
10/10/2018

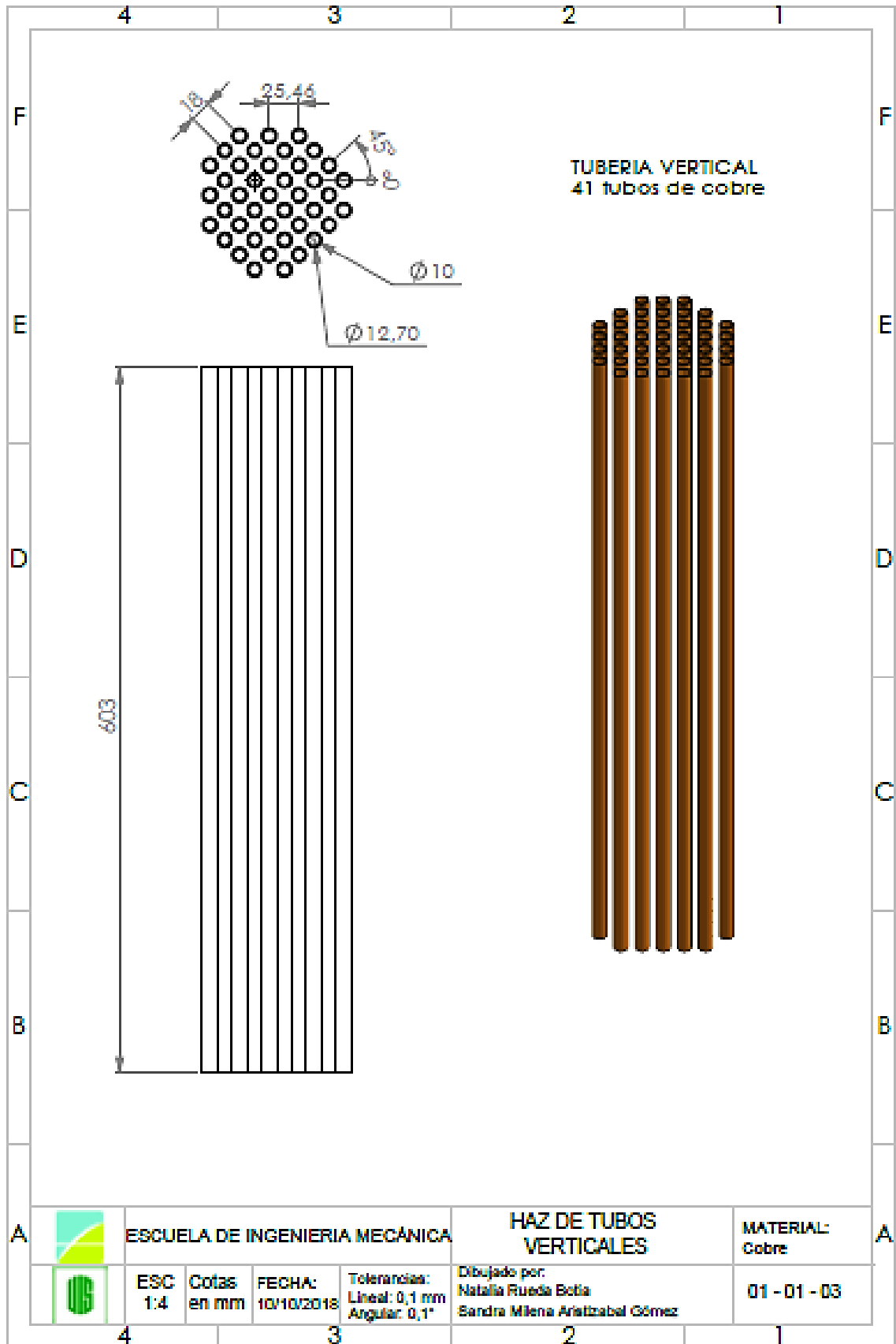
Tolerancias
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

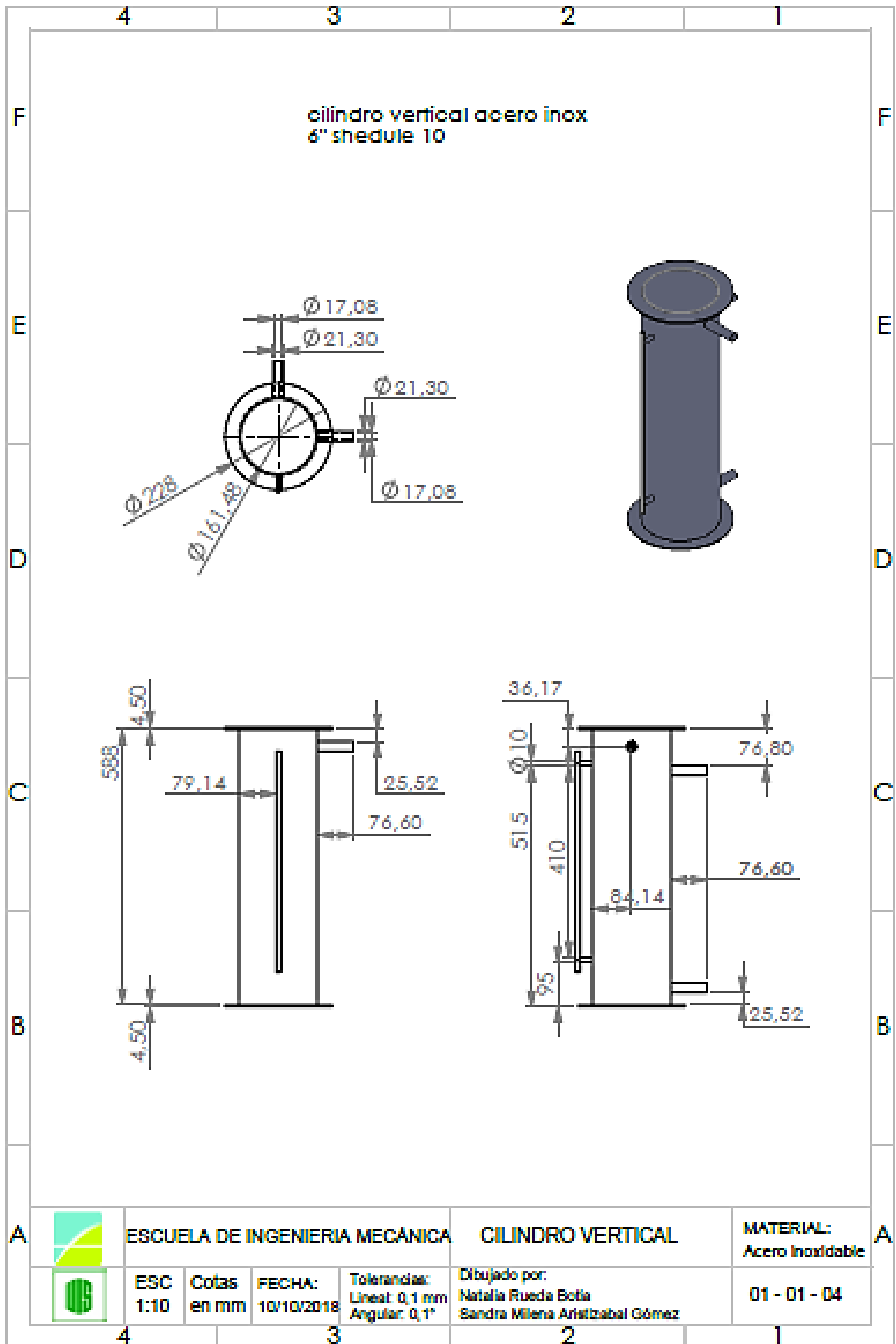
Dibujado por: Natalia Rueda Botia
Sandra Milena Aristizabal Gómez

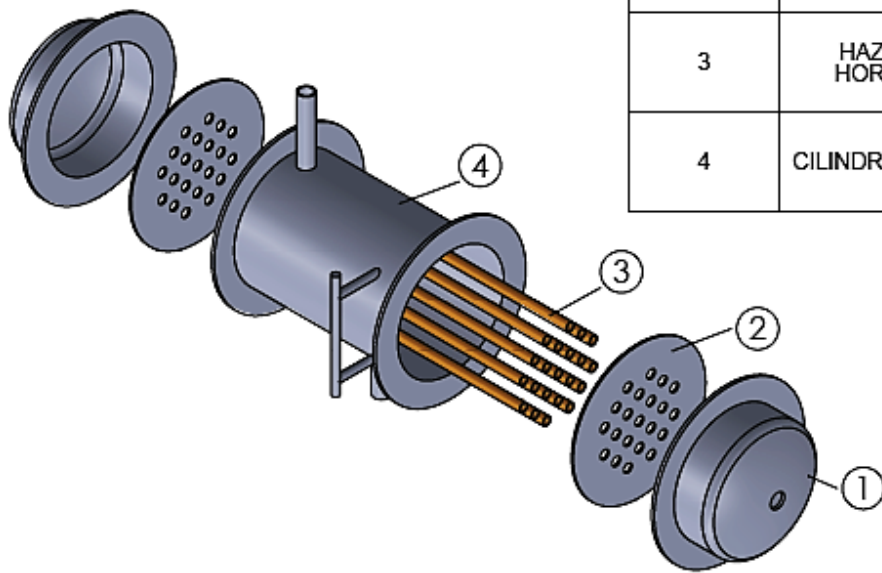
01 - 01 - 00











Nº DEL ELEMENTO	NOMBRE DE LA PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	TAPA DE LOS INTERCAMBIADORES	TAPA DE ACERO INOXIDABLE DE 6" DE DIAMETRO	2
2	PLACA DE TUBOS HORIZONTALES	PLACA DE ACERO INOXIDABLE DE 3 mm DE ESPESOR CON 21 HUECOS	2
3	HAZ DE TUBOS HORIZONTALES	HAZ DE TUBOS VERTICALES DE COBRE DE 1/2"	1
4	CILINDRO HORIZONTAL	CILINDRO DE ACERO INOXIDABLE DE 6" DE DIAMETRO	1



ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

CONDENSADOR DE AGUA

MATERIAL:
Acero inoxidable
y cobre



ESC
1:1,5

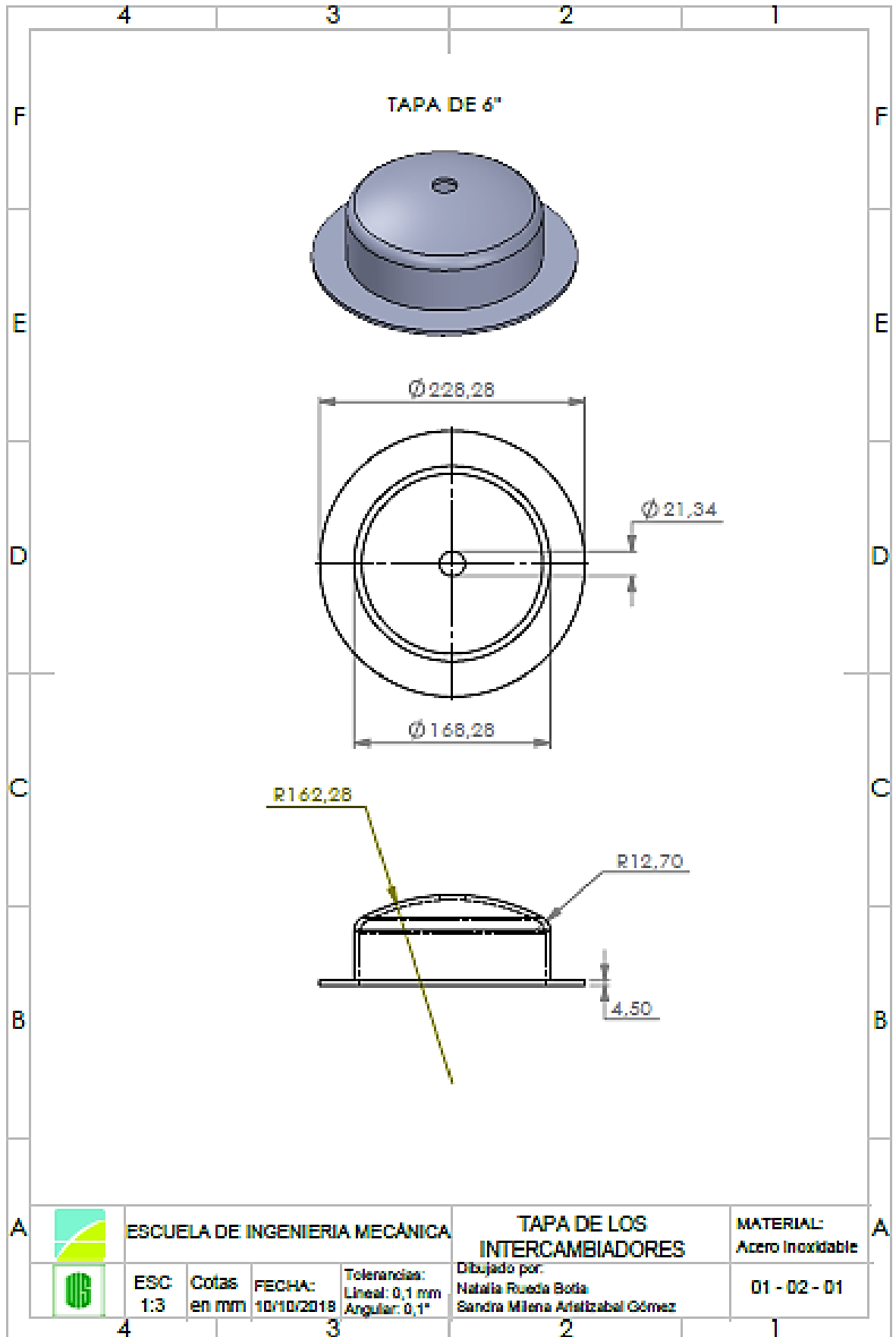
Cotas
en mm

Fecha:
10/10/2018

Tolerancias
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

Dibujado por: Natalia Rueda Botia
Sandra Milena Aristizabal Gómez

01 - 02 - 00



ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

**TAPA DE LOS
INTERCAMBIADORES**

MATERIAL:
Acero inoxidable



ESC
1:3

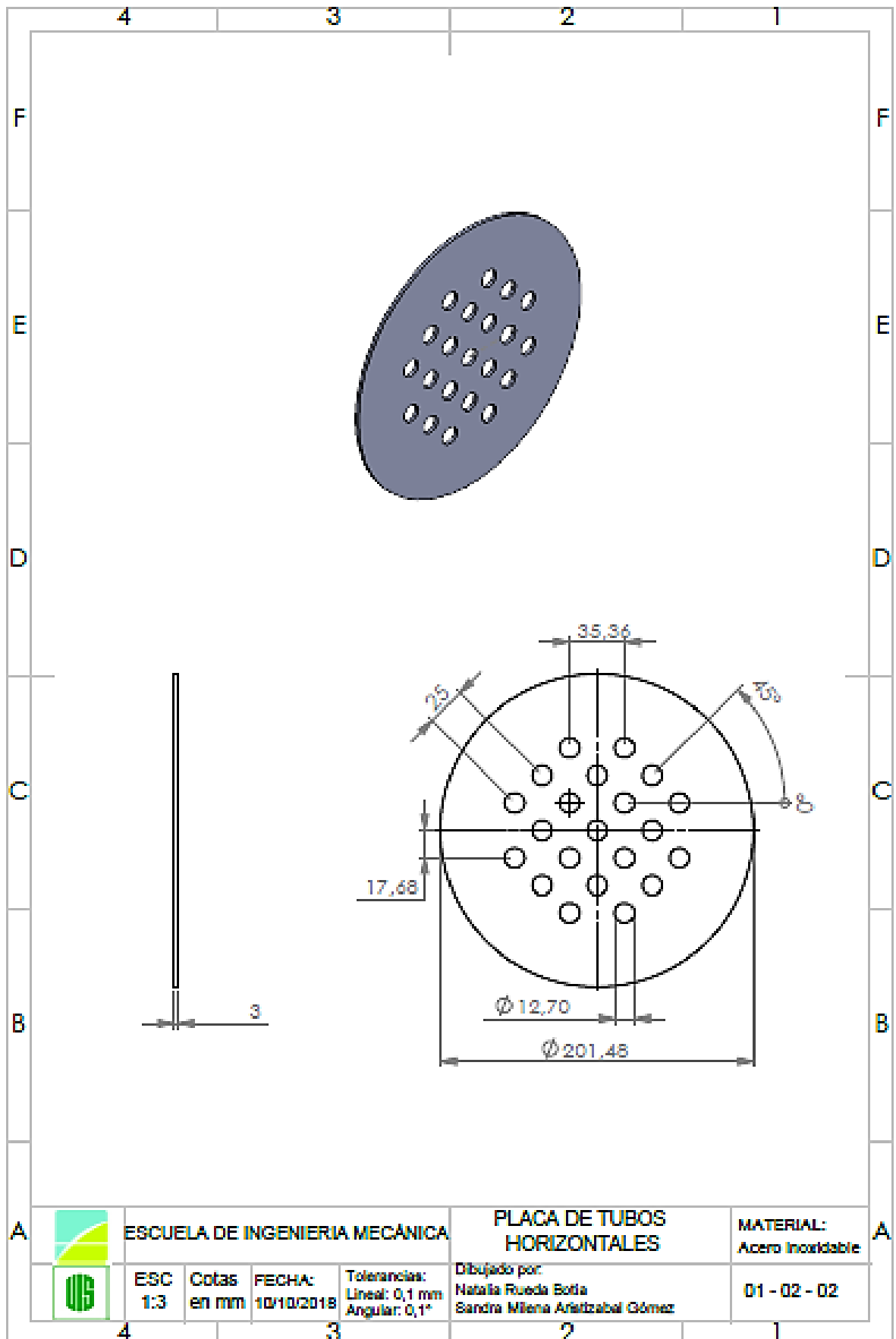
Cotas
en mm

FECHA:
10/10/2018

Tolerancias:
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

Dibujado por:
Natalia Rueda Botía
Sandra Milena Aristizabal Gómez

01 - 02 - 01



ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

PLACA DE TUBOS
HORIZONTALES

MATERIAL:
Acero inoxidable



ESC
1:3

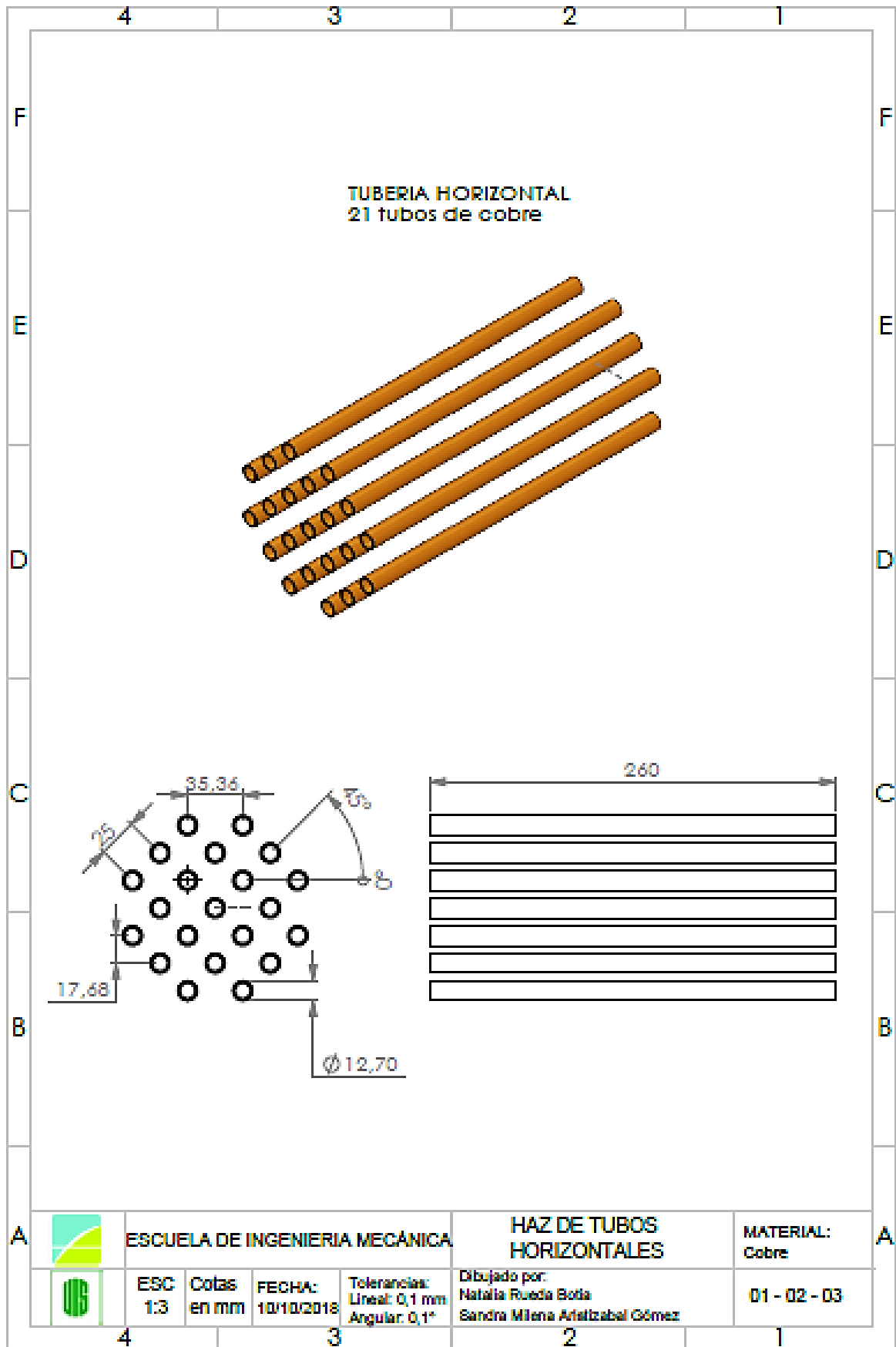
Cotas
en mm

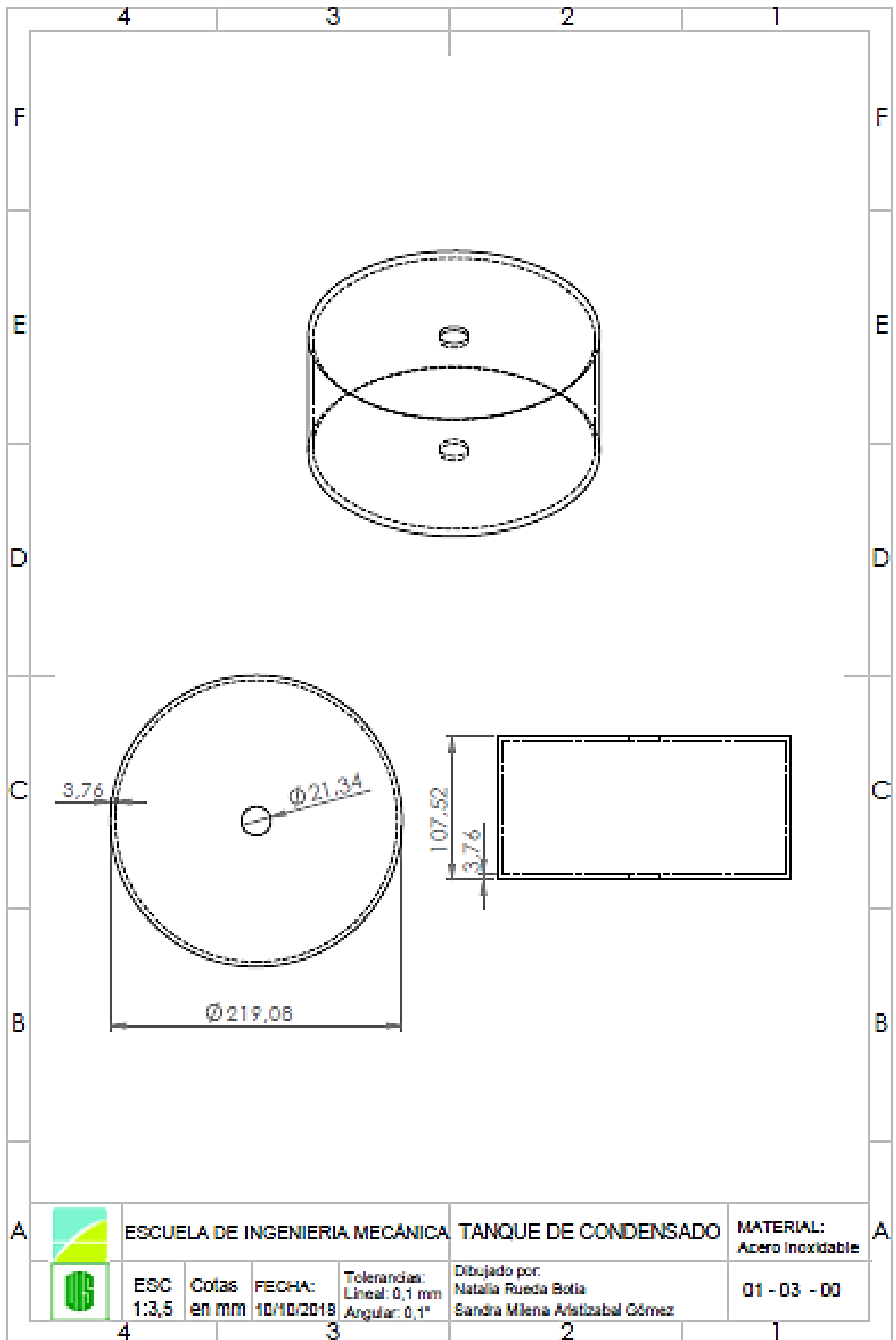
FECHA:
10/10/2018

Tolerancias:
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

Dibujado por:
Natalia Rueda Botta
Sandra Milena Aristizabal Gómez

01 - 02 - 02





ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

TANQUE DE CONDENSADO

MATERIAL:
Acero inoxidable



ESC
1:3,5

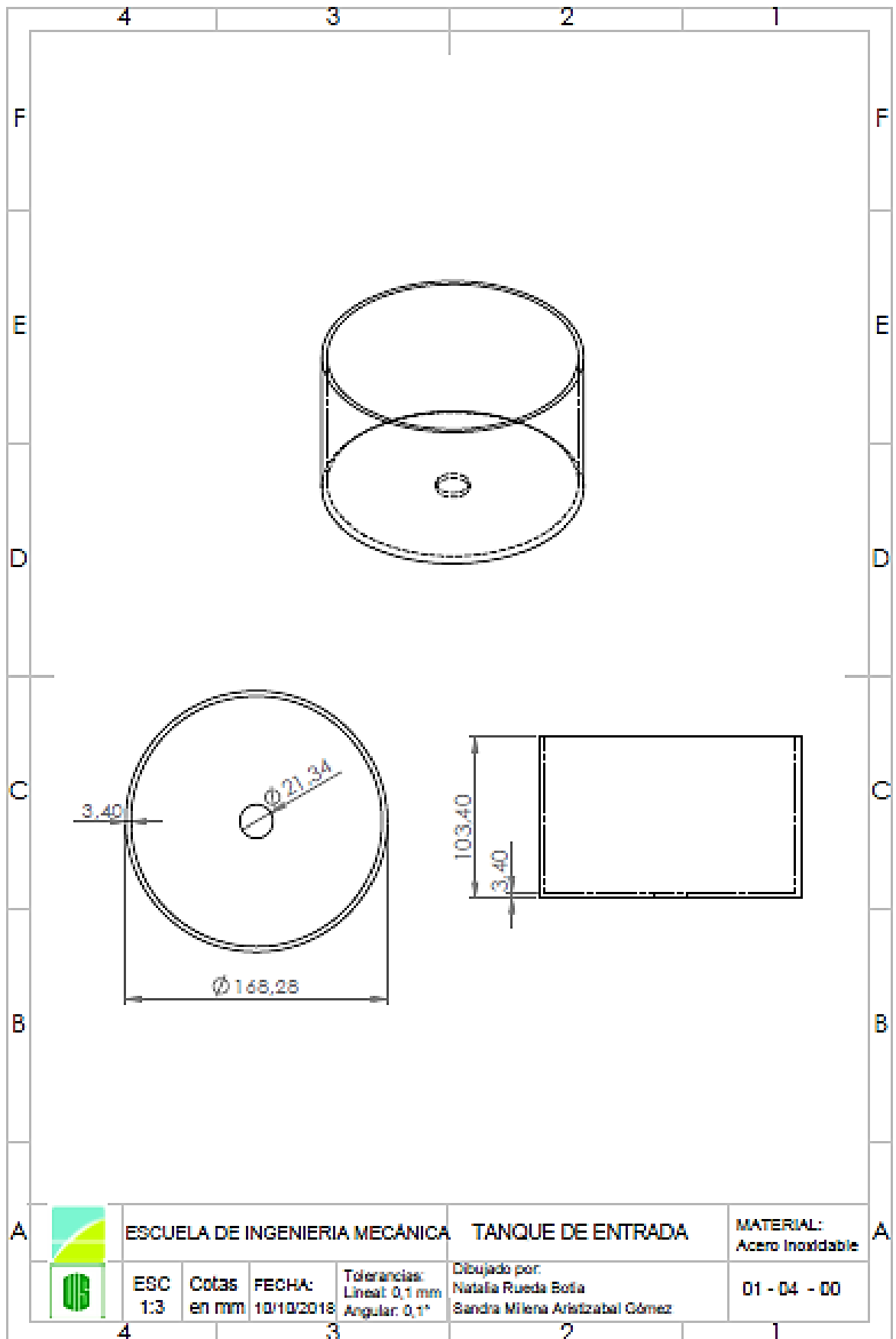
Cotas
en mm

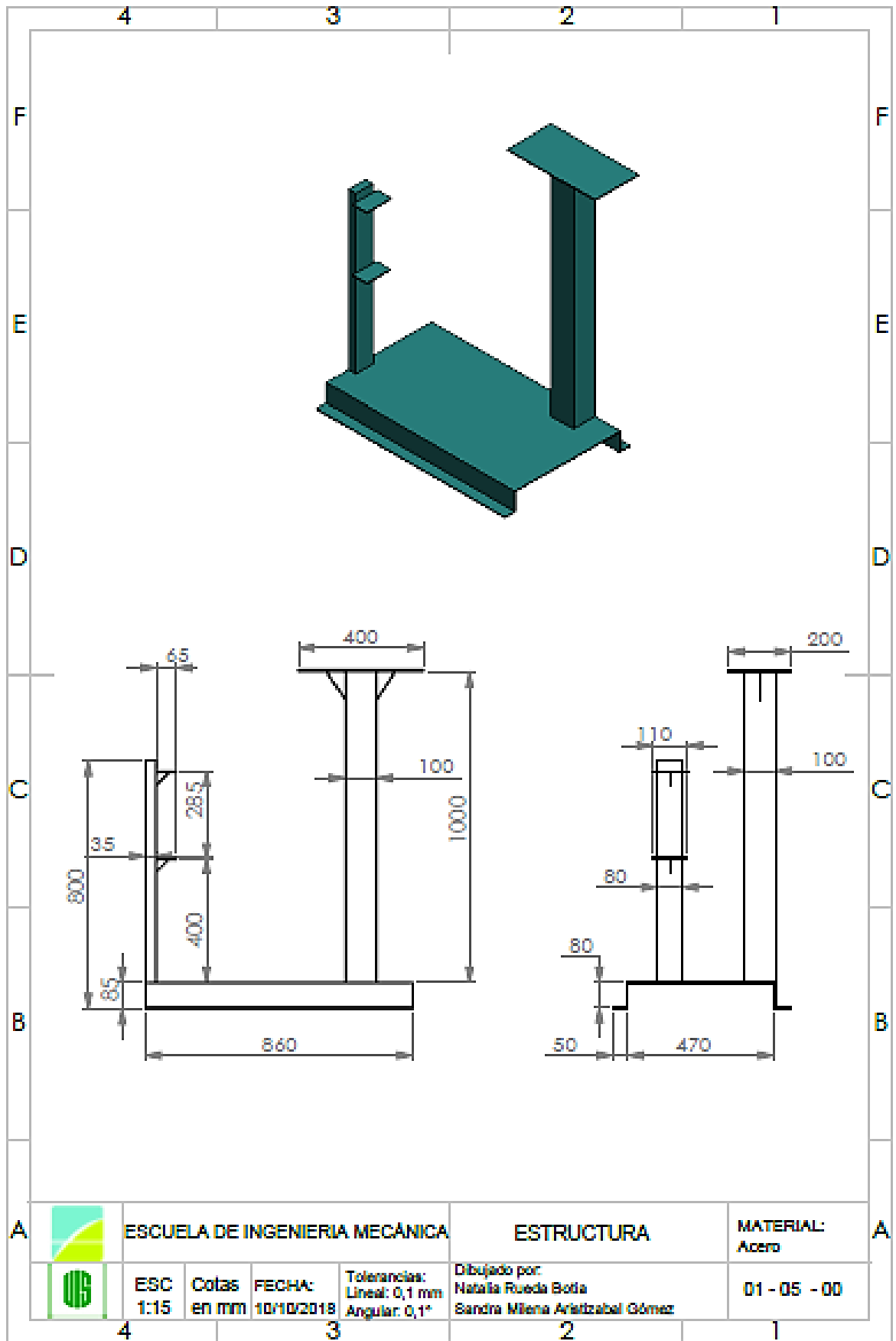
FECHA:
10/10/2018

Tolerancias:
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

Dibujado por:
Natalia Rueda Botia
Sandra Milena Aristizabal Gómez

01 - 03 - 00





ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA

ESTRUCTURA

MATERIAL:
Acero

ESC
1:15

Cotas
en mm

FECHA:
10/10/2018

Tolerancias:
Lineal: 0,1 mm
Angular: 0,1°

Dibujado por:
Natalia Rueda Botia
Sandra Milena Arrietzabal Gómez

01 - 05 - 00

**ANEXO F. TABLAS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL SISTEMA DE
EVAPORACIÓN AL VACÍO.**

PRUEBA DE AGUA LIMPIA

Prueba del nivel de vacío

Tiempo [min]	Vacío [inHg]	nivel [litros]	Tagua [°C]	Tvapor [°C]	Pbaja [psi]	Palta [psi]	Voltaje [volt]	Amperios [Amps]	Condensador Auxiliar	Restitución de agua y vacío
0	25,7	5,5	24,9	24,2	8	95	215,6	3,9		
10	25,7	5,5	30,9	21,2	7	115	215,5	3,5		
20	25,5	5,5	35,9	18,2	7	130	216,1	3,4		
30	25,2	5,5	40,1	15,6	7	150	217,2	3,3		
40	25	5,48	43,8	14	8	170	216,9	3,5		
50	24,5	5,46	46,4	13,2	10	180	217,2	3,7		
60	24	5,4	49,1	15,6	18	198	217,9	4,3		100
70	23	5,48	52	23,8	24	215	218,3	5,1		
80	22	5,4	55,3	38,6	28	220	219,7	5,5	on en 3	100
90	21,7	5,48	55,9	46,2	22	190	219,8	5,5	on en 2	
100	21,6	5,4	56,7	46,7	22	195	220,5	5,1	on en 2	100
110	21,5	5,48	57,5	45,9	23	200	218,8	5,1	on en 2	
120	21,5	5,4	58,5	47,8	24	202	218,5	5,2	on en 2	100
130	21,4	5,48	58,9	47,6	24	208	218,8	5,3	on en 3	
140	21,2	5,4	59,5	48,3	23	197	219,5	5,1	on en 3	100
150	21,2	5,48	59,9	46,2	23	195	219,6	5,1	on en 3	
160	21	5,37	60,6	46	23	195	217,5	5,1	on en 3	130
170	21	5,46	60,6	44,1	23	195	218,2	5,1	on en 3	
180	21	5,39	60,8	43,8	23	195	219	5	on en 3	100
190	20,9	5,48	60,9	41,5	22	190	219,2	5	on en 2	
200	20,6	5,4	61,6	41,1	23	200	221,3	5,1	on en 2	
210	20,5	5,32	61,8	41	23	198	221,5	5,1	on en 2	200

220	20,5	5,48	61,8	38,8	22,5	198	222,2	5	on en 2	
230	20,3	5,38	62,3	38,6	23	195	222,3	5	on en 2	100
240	20,25	5,48	62,3	37,1	22	195	222,8	5	on en 2	
250	20	5,4	63,2	36,9	22	195	222,9	4,9	on en 2	100
260	20,1	5,5	62,6	35,8	22	195	223	5	on en 2	
270	19,9	5,42	62,8	35,6	22	195	223,5	5	off	

Prueba del nivel de agua

Tiempo [min]	Vacío [in Hg]	nivel [litros]	Tagua [°C]	Tvapor [°C]	Pbaja [psi]	Palta [psi]	Voltaje [volt]	Amperios [Amps]	Condensador Auxiliar	Restitución de agua y vacío
0	25,8	5,5	24,6	24,1	9	98	214,5	4,2		
10	25,8	5,5	31,1	20,9	6	115	213,5	3,5		
20	25,7	5,49	36,2	17,5	6	130	218,3	3,4		
30	25,5	5,45	40,6	15	5	150	218	3,5		
40	25	5,42	43,7	13,3	7	165	218,2	3,5		
50	24,6	5,4	46,3	14,2	12	180	218,3	3,9		vacío
60	24,3	5,3	48,2	33,6	21	195	217,5	4,8		vacío
70	24	5,15	50,2	49,8	24	205	216,8	5,2		vacío
80	24	5	52,8	53	28	225	216,4	5,6	on en 2	
90	24,8	4,87	53,4	53,7	27	210	216,1	5,5	on en 3	
100	25,3	4,7	53,2	53,1	26	202	215	5,4	on en 3	
110	25,4	4,5	52,9	51,5	26	200	215	5,3	on en 3	
120	25,4	4,4	53,1	51,3	25	200	214,8	5,3	on en 3	
130	25,2	4,28	52,9	51,2	25	200	214,8	5,3	on en 3	vacío
140	25,3	4,1	51,8	51,8	26	205	214	5,4	on en 3	
150	25,3	3,95	51,8	50,6	28	205	212,5	5,5	on en 3	

160	25,1	3,8	52,1	50	28	205	213	5,4	on en 3	vacío
170	24,9	3,65	52,8	50,9	27	200	213,2	5,5	on en 3	Vacío
180	25,2	3,5	51,3	50,9	26	205	211,3	5,4	on en 3	
190	25,5	3,38	51,2	49,5	27	208	212,2	5,5	on en 3	
200	25,3	3,2	51,9	49,9	25	200	212,2	5,4	on en 3	
210	24,8	3,1	53,3	51,2	24	195	212,7	5,2	on en 3	
220	24,3	3	54,5	51,1	23	190	215,2	5,1	on en 3	Vacío
230	24,6	2,88	53,2	50,8	25	200	217	5,3	on en 3	
240	24,2	2,75	53,6	51,1	23	190	217,4	5	on en 3	Vacío
250	24	2,62	54,8	49,9	22	190	217,6	5	on en 3	Vacío
260	24,4	2,5	52,4	50,5	24	195	217,1	5,2	off	

Prueba de la presión de alta (condensador de refrigerante)

Tiempo [min]	Vacío [in Hg]	nivel [litros]	Tagua [°C]	Tvapor [°C]	Pbaja [psi]	Palta [psi]	Voltaje [volt]	Amperios [Amps]	Condensador Auxiliar	Restitución de agua y vacío
0	26	5,55	26,6	28,2	10	102	214,2	3,7		
10	26	5,52	34,6	22,3	9	130	215,3	3,6		
20	25,6	5,5	41,1	18,3	8	155	215,3	3,5		
30	25	5,48	44,4	16,1	9	170	215,2	3,6		vacío
40	24,6	5,4	46,8	20,2	17	188	215,3	4,4		vacío y 100
50	24	5,48	49,6	41,3	23	205	215,2	5,1		vacío
60	23	5,3	52,6	50,9	28	222	215,2	5,2	on en 1	vacío y 200
70	23,7	5,4	52,1	51,6	27	215	215,4	5,5	on entre 1y 2	vacío y 100
80	24,6	5,4	51,8	51,8	27	210	216,3	5,4	on en 2	100

90	24,9	5,4	52,4	51	26	203	216,3	5,3	on en 3	100
100	24,6	5,3	52,9	51,8	23	190	217	5	on entre 3 y 4	260 y vacío
110	24,9	5,45	52,1	50,6	23	190	216,5	5,1	on en 4	Vacío
120	24,9	5,2	51,8	49,9	23	180	217,2	5,2	on entre 4 y 5	vacío y 300
130	25,2	5,4	49,6	47,9	23	185	217,3	4,9	on en 5	100
140	25	5,45	49,3	47,8	20	170	217,9	4,7	on en 5	Vacío
150	25,2	5,3	48,6	47,2	20	172	217,6	4,7	on en 5 y 6	
160	24,9	5,2	49,2	47,2	18	160	219,5	4,5	on en 5 y 6	vacío y 300
170	25,1	5,4	47,3	45,9	19	165	219,4	4,7	on en 6	100
180	25	5,45	48,4	45,7	17	155	220,1	4,4	on en 6	Vacío
190	25	5,4	49,8	43,1	16	150	220,5	4,4	on en 6	Vacío
200	24,9	5,45	48,6	46,5	17	155	221,2	4,5	on en 6 y 7	50
210	24,9	5,45	48,6	44,3	16	150	222,8	4,4	on en 7	vacío y 50
220	25	5,42	48,5	46,2	16	155	222,7	4,4	on 8	80
230	25,9	5,45	49,1	44,6	16	150	221,1	4,4	on 9	50
240	24,6	5,45	50	42	15	145	221,1	4,3	on 10	vacío y 50
250	25	5,4	48,2	45,9	16	155	221,4	4,5	on en 11	100
260	25,9	5,5	48,5	44,1	14	145	220,9	4,4	on en 12	
270	24,6	5,4	49,4	41,6	14	142	221,7	4,4	on en 13	vacío y 100
280	24,8	5,45	48,9	44,3	15	145	222	4,4	off	

PRUEBA DE AGUA RESIDUAL A 23°C

Tiempo [min]	Vacío [inHg]	Nivel [litros]	Tagua [°C]	Tvapor [°C]	Pbaja [psi]	Palta [psi]	Voltaje [volt]	Amperios [Amps]	Condensador Auxiliar	Restitución de agua y vacío
0	25,3	5,6	23,7	23,8	10	93	215,9	4,2		
10	25,3	5,6	29,9	21,3	6	110	216,9	3,6		
20	25,3	5,6	34,6	18,2	6	124	216,3	3,3		
30	24,9	5,52	38,9	15,2	6	140	216,3	3,4	on 1	
40	24,7	5,5	40,7	13,6	6	140	216,4	3,4	off	
50	24,4	5,5	43,3	12,9	10	170	217,8	3,9	off	
60	23,7	5,5	46,2	15,8	15	180	217,4	4,3	off	Vacío
70	23,2	5,4	48,3	40,9	23,5	200	217	5,1	off	Vacío
80	23,4	5,2	50,7	50,5	26	210	217	5,4	on 2	Vacío
90	24	5	51,3	51,7	27	210	216,8	5,6	on 2	500
100	24,5	5,4	50,9	49,6	27	210	216,7	5,6	on 2	
110	24	5,3	51,8	50,6	24	220	216,6	5,4	on 3	Vacío
120	24,5	5	51,2	51,9	29	210	218,2	5,9	on 3	500
130	24,9	5,4	50,2	50,6	28	210	219,8	5,6	on 3	
140	24,6	5,2	50,7	49,6	28	210	221	5,6	on 3	
150	24,5	5,05	50,9	49,9	28	204	221,4	5,4	on 2	500
160	24,4	5,4	50,3	49,6	26	200	221,6	5,4	on2	
170	24	5,3	51,1	50,4	26	200	221,4	5,4	on2	Vacío
180	24,2	5	50,6	51,1	29	210	221,3	5,6	on2	500
190	24,5	5,4	50,4	49,1	28	210	221,7	5,5	on2	
200	24,4	5,22	51,2	50,1	28	210	220,7	5,5	on 3	
210	24	5,1	52	50,3	26	200	220,2	5,4	on2	600
220	24	5,5	50,6	49,8	25	200	220,1	5,3	on 2	Vacío

230	24,2	5,35	50,3	50,9	28	210	219	5,6	on 2	
240	24,5	5,2	50,9	50,8	28	210	218,7	5,7	on 2	
250	24,3	5	51,6	50,5	29	218	218,2	5,7	on 3	500
260	24	5,4	51,2	50,4	26	200	217,5	5,4	on 2	Vacío
270	24,5	5,2	50,7	51,2	29	210	217,5	5,6	on 3	
280	24,8	5	51	51,4	28	210	217,3	5,5	on 3	500
290	25	5,4	50,7	49,2	27	210	217,4	5,5	on 2	
300	24,5	5,25	51,5	50,2	28	212	217,1	5,6	on 2	
310	24	5	52,7	51,1	28	218	219	5,5	on 3	500 y vacío
320	24,6	5,4	50	50,5	28	208	219,2	5,5	on 2	
330	24,9	5,2	50,7	50,8	29	210	219	5,6	on 2	
340	24,5	5	51,6	50,1	28	215	219,3	5,7	on 2	500
350	24,5	5,4	51,9	50,5	27	210	218,8	5,6	on 2	
360	24	5,3	52,3	51,2	27	210	219	5,6	on 2	Vacío
370	24,4	5	51,7	52	29	216	219,2	5,6	on 3	500 y vacío
380	25,5	5,4	49,8	50,3	28	205	220,3	5,7	on 4	
390	25,8	5,2	49,6	49,8	28	203	220	5,7	on 2	
400	25,6	5	50,2	50,4	28	210	220,2	5,7	on 1	500
410	25,3	5,4	50,7	49,2	28	210	221,2	5,6	on 4	Vacío
420	25,2	5,2	50,2	50,6	28	210	221,8	5,6	on 4	
430	25,5	5	49,3	49,1	27	205	220,4	5,5	on 4	

PRUEBA CONTINUA DE AGUA RESIDUAL

Tiempo [min]	Vacío [inHg]	Nivel [litros]	Tagua [°C]	Tvapor [°C]	Pbaja [psi]	Palta [psi]	Voltaje [volt]	Amperios [Amps]	Condensador Auxiliar	Restitución de agua y vacío
0	23,4	5,6	40,2	28,4	13	140	217,5	4,7		agua a 61°
10	23,9	5,6	42,3	25,6	14	160	216,6	4,4		
20	23,6	5,52	45,9	22,2	14	180	217,6	4,2		vacío
30	24	5,4	46,4	42,2	20	180	217	4,8		vacío
40	24,1	5,3	47,8	47,9	22	190	216,4	5,1		vacío
50	24,7	5,1	50,6	50,8	26	210	216,4	5,6	on 2	
60	25,2	5	51,2	51,8	26	209	216,3	5,6	on 3	500 a 42,1°
70	25,5	5,4	49,9	50,9	26	205	215,7	5,6	on 3	
80	25,5	5,25	49,9	50,9	27	205	215,8	5,7	on 3	
90	25,4	5,1	50,1	50,2	27,5	209	215,5	5,7	on 4	
100	25,1	4,9	49,9	49,1	27	203	215	5,5	on 2	vacío y 600 a 46,2
110	25	5,4	50,1	51	27,5	209	215,8	5,5	on 5	
120	25,3	5,2	49,3	49,8	28	200	215,7	5,6	on 5	
130	25,2	5	49,5	47,6	27	201	217,6	5,5	on 2	vacío y 600 a 42,8
140	25,1	5,42	49,2	49,8	28	207	220,5	5,6	on 4	Vacío
150	25,3	5,3	48,9	49,8	28	201	221,1	5,6	on 5	
160	25,5	5	48,2	47,5	26	195	221,5	5,3	on 2	500 a 40,4
170	25,4	5,4	48,5	47,2	26	200	221,6	5,4	on 2	
180	25	5,2	49,4	48,2	26	202	221,3	5,5	on 3	vacío

190	24,7	5	49	48,8	27	205	221,4	5,5	on 2	vacío y 500 a 37
200	25	5,35	48,5	49,1	28	200	220,5	5,6	on 4	
210	25,2	5,15	48,1	48,3	26,5	200	219,2	5,5	on 2	
220	25,1	5	49,2	47,7	27	205	219,3	5,5	on 2	vacío y 500 a 43,1
230	25	5,3	48,9	49,6	28	202	218,7	5,6	on 5	vacío
240	25,4	5,1	47,8	48,3	27	195	217,5	5,5	on 3	
250	25,4	4,9	48,3	48,6	27	200	217	5,4	on 3	vacío y 700 a 49,7
260	25,4	5,4	48,2	49	27	200	216,8	5,5	on 3	
270	25,2	5,2	48,7	49	27	202	215,3	5,5	on 3	vacío
280	25,2	5	48,8	49,4	27	200	216,8	5,5	on 3	vacío y 500 a 50,5
290	25,3	5,3	48,8	49,5	28	202	217,5	5,5	on 4	
300	25,2	5,1	48,8	47,9	27	202	215,9	5,5	on 2	vacío
310	25,1	4,9	49,2	49,8	27	207	216	5,6	on 3	vacío y 600 a 57,4
320	25,1	5,31	49,3	50,1	28	202	216,5	5,6	on 5	
330	25,4	5,1	48,4	48,6	27	197	216,6	5,5	on 3	
340	25,2	4,95	49,1	47,8	27	204	217,1	5,5	on 2	vacío y 550 a 51,2
350	25,1	5,3	49,4	50	28	205	217	5,5	on 4	
360	25	5,15	49,3	48,8	27	204	216,5	5,5	on 3	vacío
370	25	4,9	49	49,3	27	200	218	5,5	on 2	vacío y 600 a 41
380	25,1	5,37	49,1	49,6	28	202	218	5,5	on 3	
390	25,3	5,15	48,9	49,6	28	202	218,7	5,5	on 4	

400	25,1	4,95	48,6	48,1	27	200	218,2	5,4	on 2	vacío y 550 a 54,4
410	25,1	5,35	48,9	49,6	27	203	219,3	5,5	on 4	
420	25	5,15	48,8	47,7	26	200	219,4	5,4	on 2	vacío
430	25	4,9	48,6	49,3	27	202	220,7	5,4	on 2	vacío y 600 a 44,2
440	25,3	5,35	48,3	49,1	27	200	222	5,4	on 3	
450	25,5	5,15	48,2	48,8	27	200	223	5,4	on 3	
460	25,4	4,95	48,6	48,3	26	195	223,2	5,3	on 2	vacío y650 a 49.5
470	25,4	5,4	48,9	49,3	27	200	223,1	5,4	on 3	
480	25,4	5,2	49,3	49,3	28	202	223,6	5,4	on 3	
490	25,4	5	49,8	48,7	28	205	224,5	5,4	on 2	vacío y 500 a 49,7
500	25,4	5,35	49,7	50,1	28	205	223,4	5,5	on 3	
510	25,4	5,15	50,1	50,3	28	206	220,2	5,6	on 3	
520	25,1	4,95	50,8	49,6	28	210	218,1	5,5	on 2	vacío y 550 a 45,9
530	24,9	5,4	51,2	51,4	28,5	210	218,7	5,8	on 4	
540	24,8	5,2	51,5	50,2	28,5	212	220,7	5,7	on 4	vacío
550	25,2	4,95	50,4	50,8	28,5	210	221,3	5,7	on 2	550 a 47,9
560	25,2	5,35	50,6	50,6	28	210	221,7	5,7	on4	vacío
570	25,2	5,15	50,8	50,9	28	210	222,6	5,7	on 4	
580	25,4	4,95	50,8	49,6	28	210	222,7	5,5	on 2	550 a 47,5
590	25	5,35	51,5	49,7	28	212	222,2	5,5	on 4	
600	25	5,2	52,1	50,1	28	205	222,5	5,4	on 4	

610	25	5	52,1	50,2	28	205	224,2	5,5	on 2	vacío y 500 a 45,6
620	25	5,37	50,5	50,9	28	210	224,4	5,5	on 4	vacío
630	25,2	5,17	50,1	50,1	28	210	224,6	5,5	on 4	
640	25,4	4,9	49,9	49,8	28	208	221	5,5	on 2	600 a 48,1
650	25,2	5,4	50,5	49,2	28	210	221,8	5,5	on 3	vacío
660	25,4	5,2	50,3	50,6	28	210	221,5	5,5	on 4	
670	25,5	5	50,3	50,1	28	205	221	5,5	on 2	500 a 48,5
680	25,3	5,37	50,9	49,6	28	210	221,7	5,5	on 3	
690	25	5,2	51,6	49,9	28	210	222,1	5,5	on 4	Vacío
700	25,3	5	51,9	50,2	28	210	222,3	5,5		off todo

**ANEXO G. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DEL AGUA DE ENTRADA Y SALIDA
DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO.**

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 07	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2018/07/25 Página 1 de 3	



"Acreditación por el IDEAM según la Resolución No. 1582 de 2018, en los parámetros Alcalinidad, Cloruros, Dureza, Nitritos, Nitratos, DBO₅, DQO, SST, SAAM, grasas y aceites, hidrocarburos en aguas, metales totales y disueltos en aguas, pH y metales totales en suelos, TCLP en residuos peligrosos y toma de muestras puntuales y compuestas"



"Autorización del Ministerio de la Protección Social, mediante la resolución 1615 de 2015, para la realización de análisis físicos, químicos y microbiológicos al agua para consumo humano"

Informe de resultados No.	I-18-676	Fecha de emisión:	Noviembre 28 de 2018
Cliente:	NATALIA RUEDA BOTIA – SANDRA ARISTIZABAL GOMEZ		
Dirección del cliente:	Escuela de Ingeniería Mecánica		
Solicitud de servicio No.	18-556	No. de muestras:	02
Fecha de recepción de las muestras:	Noviembre 07 de 2018		
Muestras recibidas por:	Amparo López G.		
Fecha de análisis:	Noviembre 07 de 2018 – Noviembre 27 de 2018		

1. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra:	18-556-01	Tipo de muestra:	Puntual
Identificación de la muestra:	ENTRADA AL EQUIPO DEPURADOR		
Matriz de la muestra:	Agua Cruda		
Muestreo realizado por:	El Cliente		
Lugar y punto de muestreo:	UIS / LABORATORIO SISTEMA TERMICO		
Fecha del muestreo:	Noviembre 07 de 2018		

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	6,45	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Color (UPC)	2465	Espectrofotométrico / SM 2120 B
Alcalinidad Total	358,58	Volumétrico, SM 2320 B
Dureza Total	190	Volumétrico, SM 2340 C
Dureza Cálcica (mg/L CaCO ₃)	65	Volumétrico-ETDA SM 3500-Ca B
Cloruros (mg Cl ⁻ /L)	151,13	Argentométrico / SM 4500-Cl ⁻ B
Sulfatos (mg SO ₄ ²⁻ /L)	185,47	Turbidimétrico / SM 4500- SO ₄ ²⁻ E
Sólidos Totales (mg/L)	1432	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Sedimentables (ml/L)	7,5	Cono Imhoff / SM 2540 F
Nitritos (mg NO ₂ ⁻ /L)	<0,02	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ ⁻ B
Nitratos (mg NO ₃ ⁻ /L)	4,0	Espectrofotométrico/RODIER
Acidez Total (mg/L CaCO ₃)	76,03	Volumétrico, SM 2310 B
Ortofosfatos (mg PO ₄ ³⁻ /L)	32,70	Espectrofotométrico/ SM 4500 P E
Tensioactivos (mg SAAML)	0,31	Espectrofotométrico / J. Rodier Modificado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	1750	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	2732,7	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 07	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2018/07/25 Página 2 de 3	

Informe de resultados No. I-18-676



Solicitud de servicio No. 18-556

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
Grasas y Aceites (mg/L)	5,83	Extracción Líquido-Líquido/Gravimétrico/SM 5520 B
Fósforo Total (mg P/L)	13,06	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₄ /L)	9,94	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg N/L)	182,47	Titrimétrico –Kjeldahl / SM 4500 N _T

2. ANALISIS FISICOQUIMICO

Codificación de la Muestra: 18-556-02	Tipo de muestra: Puntual
Identificación de la muestra: SALIDA AL EQUIPO DEPURADOR	
Matriz de la muestra: Agua Cruda	
Muestreo realizado por: El Cliente	
Lugar y punto de muestreo: UIS / LABORATORIO SISTEMA TERMICO	
Fecha del muestreo: Noviembre 07 de 2018	

PARAMETRO	RESULTADO	METODO
pH (Unidades de pH)	7,19	Potenciométrico / SM 4500-H ⁺ B
Color (UPC)	1	Espectrofotométrico / SM 2120 B
Alcalinidad Total	75,81	Volumétrico, SM 2320 B
Dureza Total	150	Volumétrico, SM 2340 C
Dureza Cálcica (mg/L CaCO ₃)	110	Volumétrico-ETDA SM 3500-Ca B
Cloruros (mg Cl/L)	4,97	Argentométrico / SM 4500-Cl ⁻ B
Sulfatos (mg SO ₄ ⁻² /L)	4,85	Turbidimétrico / SM 4500- SO ₄ ⁻² E
Sólidos Totales (mg/L)	56	Gravimétrico/ SM 2540 B
Sólidos Sedimentables (ml/L)	<0,1	Cono Imhoff / SM 2540 F
Nitritos (mg NO ₂ /L)	<0,02	Espectrofotométrico/SM 4500-NO ₂ B
Nitratos (mg NO ₃ /L)	0,4	Espectrofotométrico/RODIER
Acidez Total (mg/L CaCO ₃)	41,28	Volumétrico, SM 2310 B
Ortofosfatos (mg PO ₄ ⁻³ /L)	<0,3	Espectrofotométrico/ SM 4500 P E
Tensioactivos (mg SAAM/L)	0,12	Espectrofotométrico / J. Rodier Modificado
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg O ₂ /L)	60	Respirométrico / SM 5210 D
Demanda Química de Oxígeno (mg O ₂ /L)	95,6	Titrimétrico / Reflujo Cerrado / SM 5520 C
Grasas y Aceites (mg/L)	<2,6	Extracción Líquido-Líquido/Gravimétrico/SM 5520 B
Fósforo Total (mg P/L)	0,28	Espectrofotométrico / SM 4500 P
Nitrógeno Amoniacal (mg N-NH ₄ /L)	4,63	Titrimétrico /SM 4500 NH ₃
Nitrógeno Total Kjeldahl (mg N/L)	37,43	Titrimétrico –Kjeldahl / SM 4500 N _T

	LABORATORIO QUÍMICO DE CONSULTAS INDUSTRIALES	Código: F-PA-02	
	POST-ANALITICO	Versión: 07	
	INFORME DE RESULTADOS	Fecha: 2018/07/25 Página 3 de 3	

Informe de resultados No. I-18-676 Solicitud de servicio No. 18-556

Observaciones: Ninguna

Nota 1: Estos resultados son válidos únicamente para las muestras analizadas y reportadas por el laboratorio.

Nota 2: En caso de ser copia del resultado original se realizará la siguiente aclaración: Copia del resultado original.

Estimado cliente: Para nosotros es muy importante conocer sus inquietudes, sugerencias, felicitaciones, quejas y/o reclamos en los servicios prestados por el laboratorio, con el propósito de mejorar nuestros servicios. Le agradecemos que se comunique con el laboratorio, donde un miembro del personal amablemente recibirá su solicitud y pronto estaremos en comunicación con usted para aclarar y/o resolver su requerimiento.

Revisó y aprobó:



Luz Yolanda Vargas Fiallo
Directora del Laboratorio
Química. M.Sc Química UIS
MP PQ 1144

Elaboró: Amparo López G.

Ciudad Universitaria Carrera 27 Calle 9 – Edificio Camilo Torres/ Laboratorio 222
Conmutador: (7) 6344000 Ext. 1469-2463-2465. Telefax: (7) 6349009
Página web: <http://ciencias.uis.edu.co/lqci/> E-mail: labquimco@gmail.com
Bucaramanga - Colombia

**ANEXO H. MANUAL DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL
VACÍO.**

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

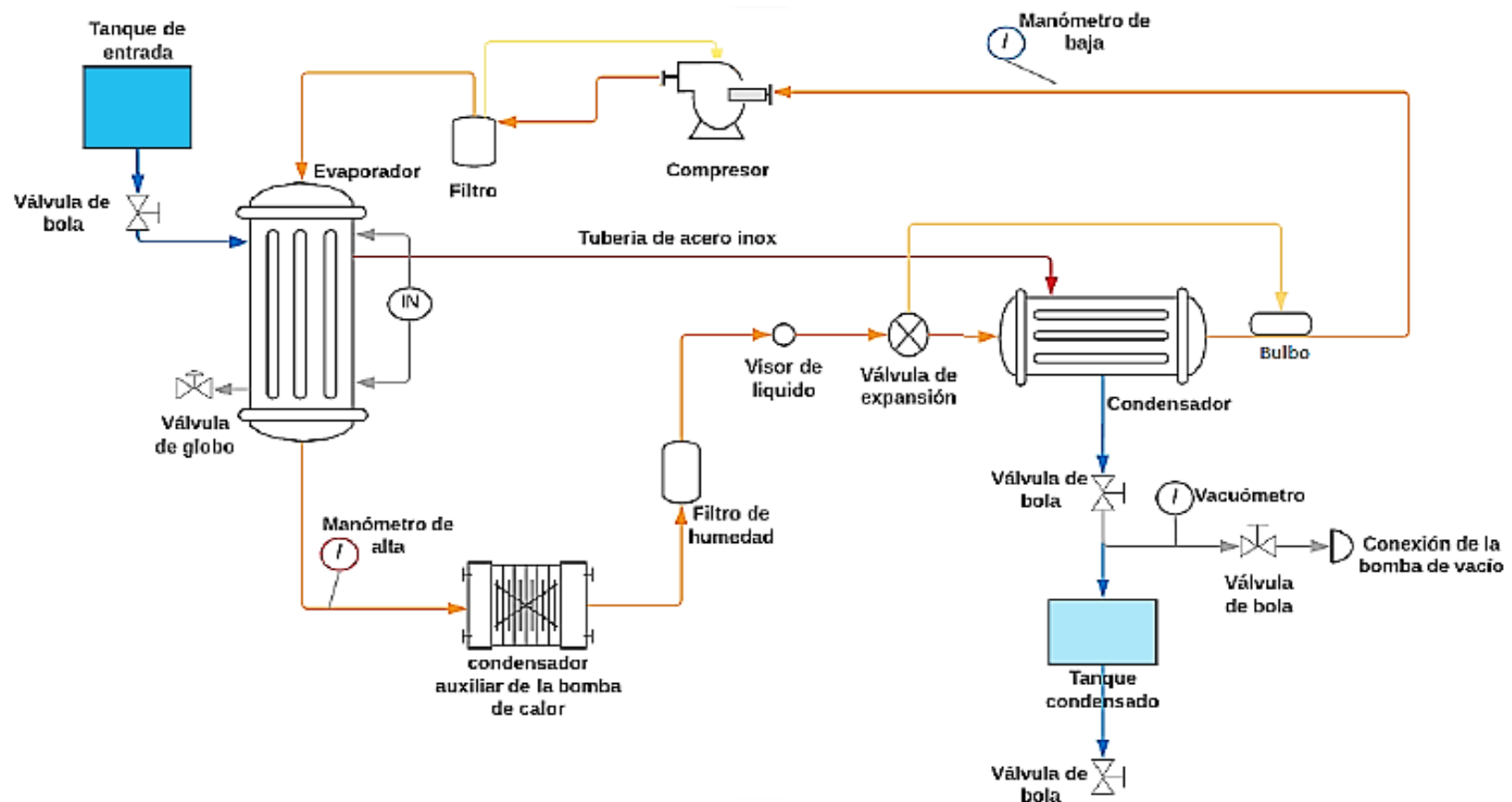
MANUAL DE OPERACIÓN

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.



SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

DIAGRAMA DE UN SISTEMA DE EVAPORACION AL VACIO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVICOLAS



SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

SUBSISTEMAS

El sistema de evaporación al vacío con bomba de calor para el tratamiento de aguas residuales avícolas se clasifica en dos subsistemas para así lograr identificar los componentes principales y su respectiva función en dicho sistema.

- Subsistema de agua

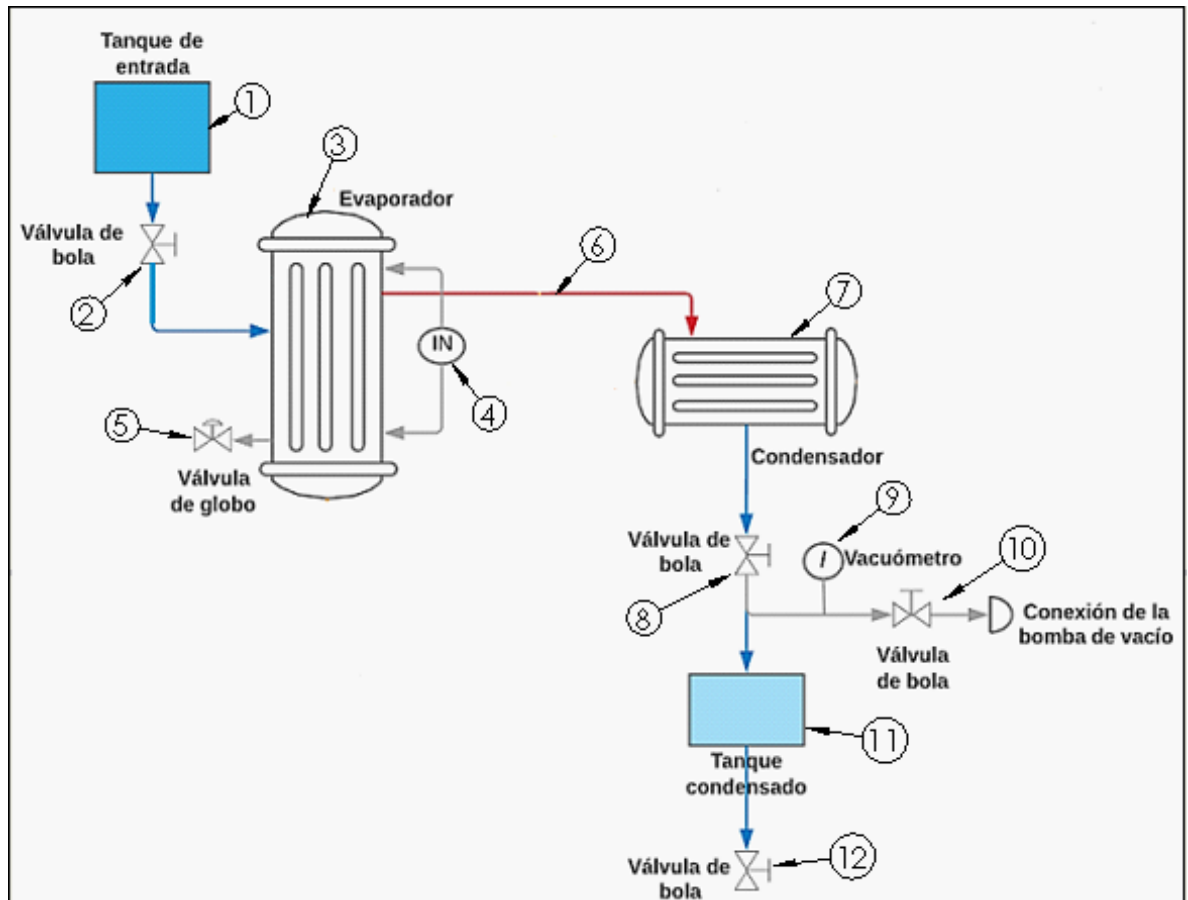
En este subsistema se da la ebullición y condensación del agua, además está compuesto por un par de tanques auxiliares con una serie de válvulas que permiten el suministro de agua a tratar y extraer el condensado, también cuenta con una conexión de la bomba de vacío para realizar el vacío necesario al subsistema.

- Subsistema de refrigeración

Este subsistema se encarga de generar el suministro y extracción de calor al subsistema de agua requerido para cumplir el objetivo del sistema (evaporar, condensar y concentrar el agua a tratar) a través del intercambio de calor producido en los intercambiadores de calor. Dicho subsistema funciona como una bomba de calor.

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

SUBSISTEMA DE AGUA



SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES
AVÍCOLAS.

COMPONENTES DEL SUSBSISTEMA DE AGUA

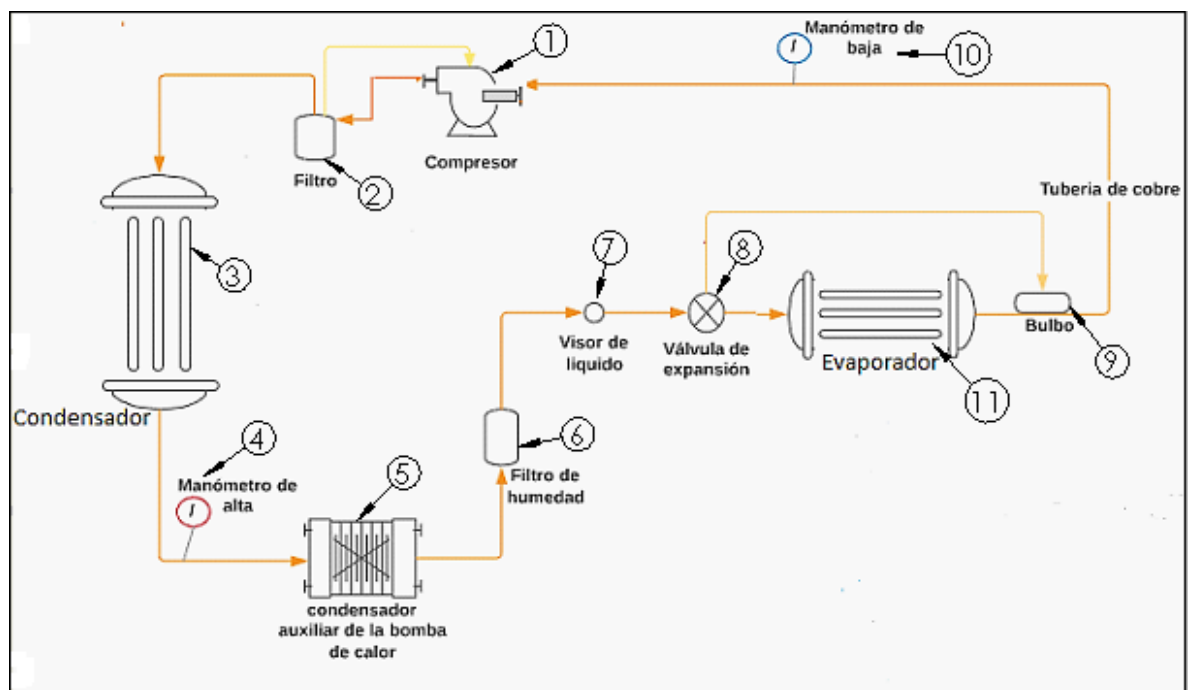
#	Elemento	Función	Descripción
1	Tanque de entrada	Permite almacenar el agua a recargar en el sistema.	Fabricado en acero inoxidable A304, 3,4 mm de espesor, capacidad de 2 litros.
2	Válvula V1	Permite el paso de agua a tratar al evaporador de agua.	Válvula de bola Napoli de ½".
3	Evaporador de agua	En el casco del intercambiador de calor se almacena el agua a evaporar.	Fabricado en acero inoxidable A304, diámetro de 6" con Schedule 10, capacidad de 5,5 litros.
4	Indicador de nivel	Permite visualizar el nivel de agua.	Indicador de nivel tipo caldera.
5	Válvula V2	Permite la extracción del agua concentrada del evaporador.	Válvula de globo de ½"
6	Tubería de vapor	Conexión entre el evaporador y el condensador de agua. Permite el paso del vapor de agua al condensador.	Fabricada en acero inoxidable A304 con un diámetro de 2".
7	Condensador de agua	En el casco del intercambiador de calor se condensa el vapor de agua.	Fabricado en acero inoxidable A304, diámetro de 6" con Schedule 10.
8	Válvula V3	Permite la separación del condensador y el tanque de condensado.	Válvula de bola Napoli de ½".

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

9	Vacuómetro	Mide el nivel de vacío en todo el subsistema de agua.	Vacuómetro con glicerina de 0 a -76 cm hg.
10	Válvula V4	Permite la conexión de la bomba de vacío.	Válvula de bola Napoli de ½".
11	Tanque de condensado	Se almacena el condensado del agua.	Fabricado en acero inoxidable A304, 3,4 mm de espesor, capacidad de 3,5 litros.
12	Válvula V5	Permite la extracción del condensado.	Válvula de bola Napoli de ½".

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUAES AVÍCOLAS.

SUBSISTEMA DE REFRIGERACIÓN



SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

COMPONENTES DEL SUSBSISTEMA DE REFRIGERACIÓN

#	Elemento	Función	Descripción
1	Compresor Danfoss GS30TG	Permite elevar la presión del fluido del refrigerante.	Compresor hermético Danfoss GS30TG de 7/8 HP, para R134a y para trabajar en aplicaciones de alta.
2	Separador de aceite	Permite la separación del aceite y el refrigerante, evitando que el aceite se contamine.	Separador de aceite 3/8" de Blue Refrigeration.
3	Condensador	Haz de tubos encargado de condensar el refrigerante y a su vez transferir el calor al agua.	Haz de tubos de cobre con 41 tubos de 1/2" de diámetro y con una longitud de 60 cm.
4	Manómetro de alta	Mide la presión de alta en el subsistema de refrigeración.	Manómetro de 0 a 300 psi.
5	Condensador auxiliar	Extrae el calor sobrante del subsistema de refrigeración, dicho calor es el trabajo del compresor.	Condensador de placas de aire-refrigerante.
6	Filtro secador de humedad	Retira la humedad y retiene las partículas de suciedad del líquido refrigerante.	Filtro secador hermético Danfoss.

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

7	Visor de líquido	Indica el estado y el contenido de humedad del refrigerante en la tubería de líquido.	Visor Danfoss tipo SGI.
8	Válvula de expansión	Expande el refrigerante.	VET Danfoss T2 con ecualizador interno para R134a, ref. 068Z3346 con orificio N° 3.
9	Bulbo sensor de temperatura.	Se encarga de cerrar o abrir la válvula para así disminuir o aumentar el ingreso de refrigerante.	
10	Manómetro de baja	Mide la presión de baja en el subsistema de refrigeración.	Manómetro de 0 a 550 psi.
11	Evaporador	Haz de tubos encargado de evaporar el refrigerante y a su vez condensar el vapor de agua.	Haz de tubos de cobre con 21 tubos de 1/2" de diámetro y con una longitud de 26 cm.

SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO CON BOMBA DE CALOR PARA EL
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES AVÍCOLAS.

RECOMENDACIONES GENERALES

- El sistema de evaporación al vacío debe operar en un ambiente con una temperatura inferior a 35°C y estar protegido de la luz solar y el agua.
- El suministro de energía debe ser únicamente de una fuente eléctrica de 220V AC.
- Verificar que el ventilador del condensador auxiliar se encuentre libre de objetos que impedir su funcionamiento.
- Asegurarse que la maquina se encuentre en una superficie completamente plana si no afectaría su funcionamiento.

OPERACIÓN DEL SISTEMA

ARRANQUE

1. Comprobar que el equipo este ubicado en un sitio accesible para su funcionamiento.
2. Verificar que el tanque de entrada y de condensado se encuentren vacíos.
3. Comprobar que las válvulas V1, V2 y V5 estén cerradas.
4. Abrir las V3 y V4.
5. Conectar la bomba de vacío a la válvula V4 y encender la bomba hasta lograr un vacío de 25 inhg.
6. Cerrar la válvula V4, apagar y desconectar la bomba de vacío.
7. Luego que el equipo tiene un vacío de 25 inhg, se procede a llenar el tanque de entrada con el agua a tratar para lograr un sello de agua y así poder conservar el vacío.
8. Con el tanque de entrada lleno, se abre lentamente la válvula V1 evitando que se forme un torbellino en el agua para que no entre aire y deshaga el vacío.
9. Se va llenando el tanque de entrada hasta que el evaporador de agua tenga un nivel de 5,5 litros.
10. Se conecta el equipo al toma de 220V.
11. Se enciende el compresor.
12. Cuando el manómetro de alta marque 210 psi y las temperaturas de agua y de vapor sean relativamente iguales se enciende el condensador auxiliar. Esto sucede entre los 50 a 80 minutos dependiendo si el equipo empezó a funcionar a una temperatura de 23°C o mayor.

RESTITUCIÓN Y EXTRACCIÓN DE AGUA

1. Si se va hacer una prueba continua se hace restitución de agua cada medio litro (mas o menos cada hora después de pasar el estado transitorio). Esto se hace llenando el tanque de entrada y abriendo lentamente la válvula V1.
2. Para extraer el condensado se cierra la válvula V3 para no perder el vacío en los intercambiadores. Se abre la válvula V4 para que se deshaga el vacío en el tanque de condensado. Se abre la válvula V5 para extraer el condensado, luego de esto se cierra.
3. Se conecta nuevamente la bomba de vacío hasta lograr un vacío superior a 25 inhg, demora aproximadamente 15 segundos. Se cierra la válvula V4, se apaga y desconecta la bomba de vacío.
4. Se abre lentamente la válvula V3 para ir igualando el vacío en todo el equipo.

APAGADO DEL EQUIPO

1. Cuando se completa la prueba a realizar, se apaga el condensador auxiliar y compresor.
2. Se abre la válvula V4 para deshacer el vacío.
3. Se abre la válvula V5 para extraer el condensado.
4. Se abre la válvula V1 para que el agua que se encuentra en el tanque caiga al evaporador.
5. Se abre la válvula V2 para retirar el agua a tratar y de esta manera vaciar el evaporador.
6. Se dejan abiertas todas las válvulas para que el equipo se enfríe.