

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EVAPORADOR AL  
VACÍO PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.**

**CLAUDIA LORENA PEDRAZA ROSAS  
GERMAN ESPINOSA SANDOVAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EVAPORADOR AL  
VACÍO PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.**

**CLAUDIA LORENA PEDRAZA ROSAS  
GERMAN ESPINOSA SANDOVAL**

**Trabajo de grado para optar por título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2014**

## DEDICATORIA

*A Dios por regalarme día a día cosas maravillosas*

*A mi padre, Mario Nel Pedraza, por acompañame en este camino y  
bríndame su apoyo, confianza, cariño y darme ánimo cada día*

*A mi madre, Ángela Yolanda Rosas, por su cariño comprensión y por  
enseñarme que aunque tropecemos siempre tendremos fuerzas para  
salir adelante*

*A mis hermanas por su amistad y estar con mígo en cada tropiezo y  
ayudarme a superarlo*

*A mi compañero de trabajo de grado German Espinosa Sandoval,  
por su amistad y colaboración en nuestro proyecto de grado*

*Y finalmente a todos mi amigos y compañeros de universidad por la  
sonrisas, tristezas, trasnochos, diversión y por acompañarme en esta  
grandiosa batalla.*

*CLAUDIA LORENA PEDRAZA ROSAS*

## DEDICATORIA

*A Dios por brindarme la posibilidad de vivir sin ninguna limitación*

*A mi padre Jesus Espinosa quien me demostró con su ejemplo que el éxito en cualquier proyecto que se inicie en la vida se logra con constancia, en compañía de la familia que es lo más importante, y por el apoyo humilde y sencillo que me a brindado, llevando su papel a cabo de la mejor manera posible.*

*A mi madre María Sandoval por su amor brindado, apoyo incondicional y templanza para que en compañía de mi padre lograrian sacar adelante hasta el último de sus seis hijos.*

*A mis hermanos y hermana, quiénes contribuyeron con su afecto, consejos y apoyo económico a que se hiciera realidad el sueño de ser profesional.*

*A mis amigos y compañeros de estudio en especial Lorena Pedraza por ser una excelente persona, íntegra con la cual formamos un equipo capaz de realizar cualquier reto como lo es el presente proyecto, por último, a mi amigo y hermano Fredy Burgos Rueda por su sincera amistad, apoyo y acompañamiento en esta etapa de mi vida.*

GERMAN ESPINOSA SANDOVAL

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al ingeniero Omar Armando Gélvez Arocha, docente de la escuela de ingeniería mecánica, por sus conocimientos aportados, interés y colaboración durante nuestra formación académica y desarrollo del proyecto.*

*A los demás docentes que nos aportaron sus conocimientos durante el aprendizaje para alcanzar las competencias académicas, éticas y morales con las cuales debe contar ingeniero mecánico de la universidad industrial de Santander.*

*A los técnicos de taller de mecanizado Henry Cruz, Gonzalo Calderón y Fredy Vargas por su colaboración y consejos durante la construcción del prototipo.*

*A nuestros compañeros de formación profesional por acompañarnos en el proceso de crecimiento intelectual y personal durante esta importante etapa de nuestra vida.*

## CONTENIDO

INTRODUCCION .....	22
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	24
1.1. PROBLEMAS DE VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.....	25
1.1.1 Aparición de fangos y flotantes .....	25
1.1.2 Agotamiento del contenido de oxígeno .....	25
1.1.3 Daño a la salud pública.....	26
1.1.4 Eutrofización .....	26
1.1.5 Otros efectos.....	26
2. JUSTIFICACIÓN .....	29
2.1. AMBIENTAL.....	29
2.2. SOCIAL .....	30
2.3. ECONÓMICO .....	30
3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	32
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	32
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	32
4. AGUAS RESIDUALES .....	33
4.1. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES.....	33
4.1.1 Aguas residuales domésticas .....	33
4.1.2 Aguas residuales industriales .....	34
4.1.3 Aguas de escorrentía pluvial.....	35
4.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA Y LAS AGUAS RESIDUALES.....	35

4.2.1	Parámetros que definen las aguas residuales .....	36
4.3.	NORMATIVIDAD VIGENTE AGUAS RESIDUALES .....	37
5.	TIPOS DE TRATAMIENTOS, SEGÚN EL CONTAMINANTE QUE CONTENGA EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL. ....	44
5.1.	TRATAMIENTOS PARA LA ELIMINACIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS	44
5.1.1	Desbaste.....	45
5.1.2	Sedimentación .....	46
5.1.3	Filtración .....	47
5.1.4.	Flotación .....	47
5.1.5	Coagulación .....	48
5.2.	TRATAMIENTOS PARA LA ELIMINACIÓN DE MATERIA DISUELTA. ....	48
5.2.1	Precipitación .....	49
5.2.2	Procesos Electroquímicos.....	49
5.2.3	Intercambio Iónico.....	49
5.2.4	Adsorción .....	50
5.2.5	Desinfección .....	50
5.3.	TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS. ....	51
5.3.1	Procesos bilógicos aerobios .....	51
5.3.2	Procesos aerobios con biomasa soportada. ....	52
5.3.3	Procesos biológicos de eliminación de nutrientes.....	53
6.	TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR EVAPORACIÓN AL VACÍO 55	
6.1.	EVAPORACIÓN AL VACÍO.....	55
6.2.	VENTAJAS DE EVAPORACIÓN A VACÍO. ....	56

6.3. DIFERENTES COMPONENTES DE SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES. ....	57
6.3.1 Fuente de energía térmica .....	58
6.3.2 Tipos de evaporador .....	62
6.3.3 Condensación .....	66
6.3.4 Conservación del vacío .....	67
7. BASES TEÓRICAS .....	74
7.1. CONVECCIÓN INTERNA FORZADA. ....	74
7.1.1 Análisis térmico .....	74
7.1.2 Flujo turbulento en tubos .....	75
7.2. CONVECCION EXTERNA FORZADA. ....	76
7.2.1 Flujo a través de bancos de tubos .....	76
7.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EBULLICIÓN. ....	80
7.3.1 Ebullición en estanque .....	83
7.3.2 Correlaciones de transferencia de calor para ebullición nucleada. ....	86
7.4. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDENSACIÓN. ....	90
7.4.1 Condensación en película .....	92
8. SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES .....	95
8.1. DISEÑO TÉRMICO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR. ....	95
8.1.1 Diseño térmico del condensador .....	96
8.1.2 Diseño térmico del evaporador. ....	105
8.2. COMPONENTES. ....	113
8.2.1 Condensador. ....	113
8.2.2 Evaporador. ....	115

8.2.3 Sistema de retiro de calor del condensador.....	117
8.2.4 Bomba de vacío.....	119
8.2.5 Bomba centrífuga para la recirculación en el circuito de suministro de calor para evaporador y circuito de condensación.....	121
8.2.6 Resistencia eléctrica.....	122
8.2.7 Tubería evaporador-resistencia.....	123
8.2.8 Tubería evaporador-condensador.....	124
8.2.9 Tubería condensador-torre de enfriamiento.....	124
8.2.10 Controlador de temperatura.....	125
8.2.11 Relé de estado sólido.....	129
8.2.12 Estructura.....	131
9. MONTAJE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE VAPORACIÓN AL VACÍO.....	132
9.1. SUBSISTEMA EVAPORADOR CONDENSADOR.....	132
9.2. SUBSISTEMA DE PRODUCCIÓN DE VACÍO.....	136
9.3. SUBSISTEMA SUMINISTRO DE CALOR.....	137
9.4. SUBSISTEMA DEL RETIRO DE CALOR.....	138
9.5. SUBSISTEMA TANQUES AUXILIARES.....	139
9.6. SUBSISTEMA DE CONTROL.....	141
9.7. SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.....	145
10. PRUEBAS REALIZADAS.....	152
10.1. PRUEBAS DE PUESTA A PUNTO.....	152
10.1.1 Prueba estanqueidad.....	152
10.2. PRUEBAS OPERATIVAS.....	153

10.2.1 Vacío en operación.....	153
10.2.2 Prueba del punto de funcionamiento.....	154
10.2.3 Prueba de concentración de sólidos.....	156
11. COSTOS .....	161
11.1.COSTO DE FABRICACIÓN.....	161
11.2.COSTO DE OPERACIÓN.....	162
11.3.COSTO DE OPERACIÓN CON ENERGÍA RESIDUAL.....	164
12. CONCLUSIONES.....	165
13. RECOMENDACIONES .....	167
BIBLIOGRAFÍA.....	169
ANEXOS .....	171

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Clasificación de los tratamientos de aguas residuales.....	27
Figura 2. Aguas residuales domesticas .....	34
Figura 3. Aguas residuales industriales .....	34
Figura 4. Aguas residuales de escorrentía pluvial .....	35
Figura 5. Reja de desbaste manual .....	45
Figura 6. Punto de ebullición del agua en función de la presión de vapor. ....	56
Figura 7. Clasificación de los evaporadores al vacío según sus componentes.....	57
Figura 8. Resistencia eléctrica para tubería.....	59
Figura 9. Caldera y sus puntos de aprovechamiento .....	60
Figura 10. Bomba de calor para agua caliente sanitaria .....	61
Figura 11. Colector Solar. ....	62
Figura 12. Evaporador de película descendente.....	63
Figura 13. Evaporador de circulación forzada.....	64
Figura 14. Evaporador de placas .....	65
Figura 15. esquema de un intercambiador de calor tipo carcaza y tubos .....	67
Figura 16. Bomba de vacío giratoria de dos etapas.....	69
Figura 17. Esquema de una bomba rotativa de aceite.....	69
Figura 18. Sección bomba de anillo líquido .....	70
Figura 19. Sección transversal típica del eyector.....	73
Figura 20. Disposición de los tubos en los bancos alineados o escalonados .....	77
Figura 21. Ebullición .....	80
Figura 22. Curva de ebullición para el agua a 1 atm.....	84
Figura 23. Condensación de película y gotas .....	91
Figura 24. Sistema de evaporación al vacío para experimentación .....	96
Figura 25. Esquema condensador .....	98

Figura 26. Esquema evaporador.....	106
Figura 27. Tubos en U de intercambiador para la condensación.....	113
Figura 28. Condensador 3D.....	114
Figura 29. Evaporador .....	115
Figura 30. Brida evaporador .....	116
Figura 31. Torre de enfriamiento.....	119
Figura 32. Bomba de vacío Quality 800.....	120
Figura 33. Bomba centrífuga.....	122
Figura 34. Resistencia eléctrica modelo NA008C.....	123
Figura 35. Manguera industrial transparente .....	123
Figura 36. Tubería evaporador-condensador.....	124
Figura 37. Acople en “U” poliuretano.....	125
Figura 38. Pirómetro .....	125
Figura 39. Esquema de conexión del pirómetro.....	127
Figura 40. Tablero de control pirómetro .....	128
Figura 41. Relé de estado solido .....	130
Figura 42. Bastidor del sistema.....	131
Figura 43. Esquema del subsistema evaporador- condensador .....	133
Figura 44. Esquema primer montaje evaporador-condensador.....	134
Figura 45. Esquema segundo montaje evaporador-condensador .....	135
Figura 46. Esquema del montaje final.....	136
Figura 47. Esquema Subsistema de producción de vacío .....	137
Figura 48. Esquema del subsistema de suministro de calor .....	138
Figura 49. Esquema del subsistema del retiro de calor .....	139
Figura 50. Esquema del subsistema tanques auxiliares .....	141
Figura 51. Esquema del tablero de control .....	142
Figura 52. Esquema del sistema de evaporación al vacío para la depuración de aguas residuales.....	143
Figura 53. Foto del sistema de evaporación al vacío para la depuración de aguas residuales construido. ....	144

Figura 54. Esquema Sistema de evaporación al vacío para la secuencia de funcionamiento.....	146
Figura 55. Esquema de componentes del paso 1 .....	147
Figura 56. Esquema de componentes paso 2.....	148
Figura 57. Esquema de la disposición de los componentes Tablero de control para el paso 3 .....	149
Figura 58. Esquema de componentes paso 4 .....	150
Figura 59. Esquema de componentes paso 5.....	151
Figura 60. Resultado del agua tratada con tinte .....	156
Figura 61. Sólidos recolectados.....	157
Figura 62. Resultado del tratamiento de aguas residual .....	158

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales.....	28
Tabla 2. Normas que deben cumplir todo vertimiento a un cuerpo de agua .....	38
Tabla 3. Normas que deben cumplir todo vertimiento a un alcantarillado público .	39
Tabla 4. Normas que deben cumplir todo vertimiento a un alcantarillado público .	40
Tabla 5. Las concentraciones para el control de la carga de las siguientes sustancias de interés sanitario.....	41
Tabla 6. Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y red de alcantarillado público. ....	43
Tabla 7. Concentraciones permisibles alcantarillado publico decreto 3930 de 2010 .....	43
Tabla 8. Correlaciones para el numero de Nusselt para el flujo cruzado sobre bancos de tubos para $N > 16$ .....	79
Tabla 9. Tensión superficial de la interfase liquido-vapor para el agua .....	88
Tabla 10. Valores del coeficiente $C_{sf}$ y de $n$ para varias combinaciones fluido-superficie.....	89
Tabla 11. Tensión superficial de algunos fluidos .....	90
Tabla 12. Procedimiento de cálculo del condensador.....	99
Tabla 13. Procedimiento de cálculo del evaporador. ....	107
Tabla 14. Parámetros físicos del condensador .....	114
Tabla 15. Parámetros físicos del evaporador.....	116
Tabla 16. Información Técnica bomba de vacío Quality qvp 800.....	120
Tabla 17. Ficha técnica bomba PLASET-ITALY .....	122
Tabla 18. Datos tomados para el punto de funcionamiento .....	154

Tabla 19. Comparación del análisis fisicoquímico de agua residual .....	158
Tabla 20. Costo del proyecto .....	161
Tabla 21. Amperios y voltaje de componentes del sistema .....	162
Tabla 22. Costo de operación .....	163

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A. Catálogos .....	172
Anexo b. Código en EES de diseño térmico de condensador.....	183
Anexo C. Código en ees de diseño térmico de evaporador.....	192
Anexo D. Calculo del volumen interior subsistema evaporador- condensador ...	198
Anexo E. Planos del sistema .....	201
Anexo F. Sistemas de evaporación al vacío para el tratamiento de aguas residuales que existen actualmente .....	220
Anexo G. Reporte de resultados de la siama del efluente UIS .....	224
Anexo H. Reporte de resultados de la siama del efluente empresa avícola .....	225

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE EVAPORADOR AL VACÍO PARA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES\*.

**AUTORES:** CLAUDIA LORENA PEDRAZA ROSAS  
GERMAN ESPINOSA SALDOVAL\*\*

**Palabras claves:** Agua residual, tratamiento, vacío, prototipo.

Por la necesidad que existe de buscar una solución al vertido de aguas residuales a los cuerpos de agua y suelos por parte de las industrias que utilizan el recurso hídrico en sus procesos productivos, se diseñó un prototipo para el tratamiento de estas aguas orientado hacia las producidas por industrias avícolas. Debido a que se requería utilizar energías de baja calidad para su operación se toma la decisión de utilizar el principio de evaporación al vacío ya que este permite la evaporación a bajas temperaturas y además presenta otras ventajas, como la no adición de químicos, que lo hacen especial y ameritan su estudio en la aplicación de tratar aguas residuales. Para el diseño del sistema se realizó el modelamiento térmico correspondiente, teniendo criterios bases como la cantidad de agua que deseaba tratar; logrado con este un dimensionamiento básico de cada uno de los componentes que conforman el sistema. Después de diseñar el prototipo para depurar aguas residuales se realizó la respectiva construcción del mismo. Posteriormente se llevaron a cabo varias pruebas para comprobar que el sistema funcionara correctamente. En seguida se tomaron muestras del fluido ya tratado y se sometieron a pruebas físico- químicas en el laboratorio, las cuales permitieron determinar su calidad teniendo como base los límites máximos de contaminantes permitidos en el acuerdo 1594 de 1984 capítulo VI y el decreto 3930 de 2010, de la normatividad del vertimiento de aguas, y de esta manera analizar la viabilidad del sistema para uso en las industrias avícolas. Finalmente se realizan recomendaciones correspondientes para el sistema de evaporación al vacío.

---

\* Trabajo de grado

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

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A PROTOTYPE VACUUM EVAPORATOR FOR INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT\*.

**AUTHOR:** CLAUDIA LORENA PEDRAZA ROSAS  
GERMAN ESPINOSA SALDOVAL\*\*

**KEYWORDS:** Residual water, treatment, vacuum, prototype.

The need exists to find a solution to the discharge of waste into bodies of water and soils by industries that use water resources water in their production processes, a prototype for the treatment of these waters produced oriented designed for poultry industries. Because it was necessary to use low-grade energy for operation decision principle of using vacuum evaporation as this allows the evaporation at low temperature and also has other advantages such as no chemical addition is made, that do special and deserve study in the application of treated wastewater. In designing the system the corresponding thermal modeling was performed, with bases like criteria amount of water desired address; achieved with the basic sizing of each of the components that comprise the system. After designing the prototype for purifying wastewater respective construction thereof was performed. Subsequently conducted several tests to verify that the system worked correctly. Then fluid samples were collected and treated and subjected to physicochemical tests in the laboratory, which allowed to determine their quality on the basis of Maximum contaminants allowed in accordance Chapter VI 1594 1984 and Decree 3930 of 2010 , the regulations of the dumping of water, and thus to analyze the viability of the system for use in the poultry industries. Finally corresponding recommendations for vacuum evaporation system are performed.

---

\* Work Degree

\*\* Faculty of Physics-Mechanic Engineering, School of Mechanical Engineering, Director Omar Armando Gelvez Arocha.

## INTRODUCCION

En vista del elevado impacto ambiental que a generado el vertido de aguas residuales industriales se hace indispensable buscar soluciones más amigables con el ambiente que contribuyan a disminuir los problemas en cuerpos de agua cercanos a las industrias.

Debido a que los entes reguladores de vertimiento de aguas se han vuelto cada vez más estrictos con la certificación ambiental NTC ISO 14001<sup>1</sup> , las empresas están obligadas a buscar nuevos tipos de tratamientos para cumplir con dichos requerimientos, por lo cual se hace necesario estudiar la viabilidad de nuevos tipos de tratamientos de aguas residuales y se decidió contribuir a la solución de esta problemática con el diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío para la depuración de dichos vertimientos.

Lo referente con el diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío para la depuración de aguas residuales fue dividido en los siguientes capítulos

Capítulo 1. Se presenta la descripción del problema que se desea abordar.

Capítulo 2. Se realiza una descripción de las aguas residuales.

Capítulo 3. Se muestran los tipos de tratamientos de aguas residuales existentes.

Capítulo 4. Se describe el tratamiento de aguas por evaporación al vacío.

---

<sup>1</sup> ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DE NORMALIZACIÓN. Sistemas de Gestión Ambiental: Requisitos con orientación para su uso. ISO 14001: 2004. 1ed. Bogotá: ICONTEC, 2004.

Capítulo 5. Se muestran las bases teóricas utilizadas para la realización del proyecto.

Capítulo 6. Se realiza una descripción detallada del sistema de evaporación diseñado con su respectivo diseño térmico de los intercambiadores.

Capítulo 7. Se realiza la descripción del proceso de construcción del sistema.

Capítulo 8. Se detallan las pruebas realizadas al equipo para obtener un funcionamiento óptimo y los resultados de estas pruebas.

Capítulo 9. Se describen los costos de fabricación y operación del sistema.

## 1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La contaminación de agua es una problemática mundial por sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la salubridad de las comunidades que entran en contacto con este tipo de aguas, es por lo tanto de vital importancia el conocimiento de procesos para el tratamiento de las mismas. aguas residuales son una de las mayores fuentes de contaminación son las, debido a que estas contaminan de una manera irracional los ecosistemas en aquellos lugares donde son vertidas como lagos, lagunas, ríos, costas entre otros, afectando el delicado equilibrio de los organismos como los animales y las plantas; aunque el hombre no se encuentra en estas zonas de vertido ha llegado a depender intensamente del medio ambiente acuático para satisfacer sus necesidades tecnológicas y sociales; Teniendo en cuenta que muchos de estos lugares son una fuente de agua dulce o simplemente por estar ubicados cerca de poblaciones resultan una fuente de infección y contaminación para los habitantes cercanos.

En Colombia según la ANDESCO (asociación nacional de empresas de servicios públicos y comunicaciones) solamente en 30 % de las aguas residuales reciben tratamientos que no son muy adecuados con un faltante de 70 % la cual no es tratada.<sup>2</sup> Por lo cual los grandes volúmenes de agua residual se convierte en un problema ambiental debido a que cambian las características físicas y bioquímicas de agua afectando los abastecimientos de agua potable y perturbando la calidad de vida de sus pobladores.

A continuación se nombran algunos de los problemas de los vertimientos de aguas

---

<sup>2</sup> RCN la radio. El 70% de aguas residuales de Colombia no se trata y se usa para cultivos. [en línea]. 2012.[ citado [19-ene-2014]. Disponible en internet en: <http://www.rcnradio.com/noticias/el-70-de-aguas-residuales-de-colombia-no-se-trata-y-se-usa-para-cultivos-35263>

## **1.1. PROBLEMAS DE VERTIMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

Las aguas residuales industriales han causado durante años problemas a sistemas fluviales, daños a la salud pública entre otros, a continuación se describen uno a uno estos inconvenientes.

**1.1.1 Aparición de fangos y flotantes.** Existen en las aguas residuales sólidos en suspensión de gran tamaño que cuando llegan a los cauces naturales pueden dar lugar a la aparición de sedimentos de fango en el fondo de dichos cauces, alterando seriamente la vida acuática a este nivel, ya que dificultará la transmisión de gases y nutrientes hacia los organismos que viven en el fondo.

Por otra parte, ciertos sólidos, dadas sus características, pueden acumularse en las orillas formando capas de flotantes que resultan desagradables a la vista y además, pueden acumular otros tipos de contaminantes que pueden llevar a efectos más graves.

**1.1.2 Agotamiento del contenido de oxígeno.** Los organismos acuáticos precisan del oxígeno disuelto en el agua para poder vivir. Cuando se vierten en las masas de agua residuos que se oxidan fácilmente, bien por vía química o por vía biológica, se producirá la oxidación con el consiguiente consumo de oxígeno en el medio.

Si el consumo de oxígeno es excesivo, se alcanzarán niveles por debajo del DO\* necesario para que se desarrolle la vida acuática, dándose una muerte masiva de seres vivos.

Además, se desprenden malos olores como consecuencia de la aparición de procesos bioquímicos anaerobios, que dan lugar a la formación de compuestos volátiles y gases.

---

\* Concentración de oxígeno disuelto

**1.1.3 Daño a la salud pública.** Los vertidos de efluentes residuales a cauces públicos, pueden fomentar la propagación de virus y bacterias patógenos para el hombre.

**1.1.4 Eutrofización.** Un aporte elevado de nitrógeno y fósforo en los sistemas acuáticos propicia un desarrollo masivo de los consumidores primarios de estos nutrientes; zoo y fitoplancton y plantas superiores. Estas poblaciones acaban superando la capacidad del ecosistema acuático, llevando a desaparecer la masa de agua.

**1.1.5 Otros efectos.** Pueden ser muy variados y van a ser consecuencia de contaminantes muy específicos, como valores de pH por encima o por debajo de los límites tolerables, presencia de tóxicos que afecta directamente a los seres vivos, etc.<sup>3</sup>

Debido a estos problemas actualmente existen varios tipos de tratamientos físicos-químicos y biológicos, los cuales se muestran en la figura 1 y posteriormente en la tabla 1 se observan las ventajas y desventajas que poseen cada uno de ellos.

---

<sup>3</sup>Adela. Aguas residuales. [En línea]. [Citado 17-ene-2014]. Disponible en internet: <http://html.rincondelvago.com/aguas-residuales.html>

Figura 1. Clasificación de los tratamientos de aguas residuales.



Tabla 1. Ventajas y desventajas de los diferentes tipos de tratamientos de aguas residuales

Tipos de tratamientos de aguas residuales	Ventajas	Desventajas
<p><b>Físico- Químico- Biológico</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ser aplicado en diversidad de aguas.</li> <li>• Menor sensibilidad a las variaciones de caudal y composición.</li> <li>• Permiten la remoción de un importante de sólidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requieren un control, manejo y disposición adecuada.</li> <li>• Requieren grandes costos energéticos.               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Personal especializado para el mantenimiento.</li> </ul> </li> <li>• Producción de lodos</li> </ul>
<p><b>Térmico</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reciclaje del agua evaporada.</li> <li>• Altamente efectivo.</li> <li>• Aplicación en diversas aguas.</li> <li>• Posibilidad de utilizar energía de baja calidad (Desechos de otros procesos industriales)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo elevado de fabricación.</li> </ul>

## 2. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento y la depuración de aguas residuales proporcionan beneficios de tipo:

- Ambiental
- Social
- Económico

Que justifican su implementación.

### 2.1. AMBIENTAL.

La legislación ambiental en Colombia con respecto al vertimiento de aguas residuales decreto 15 94 de 1984 capítulo VI “DEL VERTIMIENTO DE LOS RESIDUOS LIQUIDOS” en sus artículos 72 al 74 define los las normas que deben cumplir todo vertimiento a un cuerpo de agua, también el decreto 3930 de 2010 en su capítulo VI “DE LOS VERTIMIENTOS” nos habla acerca de la normativa existente para la disposición de las aguas residuales. No solamente las empresas que producen estos vertimientos están en la obligación de cumplir con estas exigencias de los decretos si no también cualquier persona natural o jurídica; solo que del tratamiento de las aguas producidas por estas últimas es realizado por empresas privadas o públicas a las cuales se les paga por realizar este servicio. En el país las empresas que quieran certificarse en los sistemas de gestión ambiental deben cumplir los requisitos de la NTC-ISO 14001 norma que no es más que cumplir con toda la normatividad que existe en la región donde se valla a aplicar, esto les trae beneficios de índole competitivo ya que hay empresas que en las licitaciones de contratos exigen estas certificaciones.

Independiente de la obligatoriedad el tratamiento de agua residual es de vital importancia porque se mitiga cualquier foco de contaminación tanto a los cuerpos de aguas superficiales como a los suelos.

## **2.2. SOCIAL**

En la parte social se justifica el tratamiento de aguas residuales, para mejorar la calidad de vida de las personas que viven en las riberas de los diferentes afluentes ya contaminados, que afectan a esta población generándole problemas de tipo sanitario como: enfermedades respiratorias, malos olores, enfermedades gastrointestinales. También se contribuiría con dar un mejor aspecto a los afluentes recuperándose lugares para la recreación. Por otra parte se evitaría la contaminación de acuíferos ya que los lixiviados producidos por el vertimiento de aguas residuales en los suelos llegan a estos depósitos subterráneos de donde se extrae agua en algunos lugares donde los cuerpos de agua se encuentran muy cercanos trayendo problemas de salud.

## **2.3. ECONÓMICO**

Si se realiza el tratamiento de las aguas residuales se reduciría en gran medida los costos relacionados con:

- Tratamiento médico que se generan por el consumo de agua contaminada por el vertimiento de estas.
- Se reduciría el (CTADA)\* y (GPA)\*\*

---

\* Costos Totales por Agotamiento y Degradación Ambiental

\*\* Gastos en Protección Ambiental

- los insumos hídricos en las empresas debido a la reutilización de aguas ya depuradas.
- Los alimentos provenientes de los cuerpos de agua, puesto que existiría un hábitat favorable para la reproducción y conservación de estas especies.

### **3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.**

#### **3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Continuar con la misión del programa de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander de; promover una cultura orientada al aprovechamiento racional de la energía y la conservación de los recursos naturales; con la investigación y aplicación de tecnología para el tratamiento de aguas residuales industriales por medio de un prototipo de evaporación al vacío.

#### **3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Desarrollar un prototipo de un sistema térmico con evaporación al vacío para tratar 2 Kg/h de aguas residuales provenientes de industrias avícolas. Que cumplan con las siguientes especificaciones de diseño:

- Temperatura de evaporación de media (50°C).
- Sistema de calentamiento de tipo convencional por resistencia eléctrica.
- Condensador enfriado por agua proveniente de una torre de enfriamiento.
- Construir un prototipo a escala para la experimentación y evaluación.
- Realizar un estudio de la calidad del agua del proceso de tratamiento térmico.
- Diseñar la maquina térmica utilizando la herramienta computacional: CAD (Solidworks)

## **4. AGUAS RESIDUALES**

Las aguas residuales son aquellos líquidos que han sido utilizados en actividades domésticas, comerciales, industriales o de servicios. Los cuales después de pasar por este proceso aparecen sucios y contaminados; llevando grasas, detergentes, materia orgánica. Por tal razón deben ser tratadas con el fin de que una gran parte de esta sea descontaminada antes de llegar a la naturaleza.

### **4.1. TIPOS DE AGUAS RESIDUALES.**

A continuación se describe cada uno de los tipos de aguas residuales que existen actualmente.

**4.1.1 Aguas residuales domésticas.** Estas aguas residuales son aquellas relacionadas con el consumo de agua potable de las actividades humanas en el lavado de platos, duchas, lavamanos, y servicios sanitarios y similares como se muestra en figura 2. La calidad de esta agua es muy uniforme y varía muy poco con respecto al nivel socioeconómico y cultural de las poblaciones.

Figura 2. Aguas residuales domesticas



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Aula Virtual del Agua. Fuentes de Agua residual. (en línea) Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. [ Salamanca, España ] Disponible en Internet: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni\\_03/u3c3s2.htm](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni_03/u3c3s2.htm)

**4.1.2 Aguas residuales industriales.** Son aquellas aguas que han sido utilizadas en los procesos industriales como se observa en la figura 3, recibiendo de tales métodos subproductos químicos contaminantes. La calidad de estas aguas es sumamente variable y en su mayoría requiere de estudios particulares para cada industria.

Figura 3. Aguas residuales industriales



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Aula Virtual del Agua. Fuentes de Agua residual. (en línea) Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. [Salamanca, España] Disponible en Internet: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni\\_03/u3c3s2.htm](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni_03/u3c3s2.htm)

**4.1.3 Aguas de escorrentía pluvial.** Estas aguas residuales sobrevienen cuando la precipitación del agua lluvia fluye sobre las aceras y calles recogiendo basura, químicos, suciedad y otro contaminantes como se puede observar en la Figura 4, causando impactos ambientales debido que en algunas ocasiones fluyen directamente a los lagos, arroyos, ríos, humedales o aguas costeras, opacando las aguas lo hace difícil el crecimiento de aguas acuáticas.

Figura 4. Aguas residuales de escorrentía pluvial



Fuente: UNIVERSIDAD DE SALAMANCA. Aula Virtual del Agua. Fuentes de Agua residual. (en línea) Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. [Salamanca, España] Disponible en Internet: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni\\_03/u3c3s2.htm](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni_03/u3c3s2.htm)

## **4.2. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA Y LAS AGUAS RESIDUALES.**

El agua contiene sustancias químicas, físicas y biológicas disueltas o suspendidas en ella. Su calidad se evalúa de acuerdo sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas, cuya evaluación debe hacerse mediante pruebas que produzcan resultados congruentes y que tengan aceptación universal, a fin de ser posibles las comparaciones significativas con los estándares de calidad del agua, los cuales están basados generalmente en uno o dos criterios que son: calidad de las aguas superficiales que incluyen el establecimiento de calidad del agua de los

cuerpos receptores y normas de limitación de vertidos que establecen la calidad de las aguas residuales en su punto de vertido mismo.

**4.2.1 Parámetros que definen las aguas residuales.** Para optimizar el tratamiento, disposición final y minimizar los efectos de los vertimientos de las aguas residuales, se hace necesario conocer sus parámetros obteniendo así un mejor manejo ambiental de los desechos y un mejoramiento en cuanto a la calidad del agua. Los cuales se analizan a continuación.

**4.2.1.1 Microorganismos.** Las aguas residuales proporcionan un ambiente para la creación de bacterias, mohos, algunos virus y protozoarios.

**4.2.1.2 Materia inorgánica.** Aunque constituye solo un 10%, la presencia de compuestos inorgánicos representa el mayor problema de contaminación por la dificultad de su eliminación. Los parámetros de medición están dados en base a las diferentes propiedades de los compuestos inorgánicos, pH, DBQ, conductividad, presencia de sales, etc.

**4.2.1.3 Materia orgánica.** Las proteínas y carbohidratos constituyen un 90% de la materia orgánica de las aguas residuales. Las fuentes de estos contaminantes incluyen residuos de alimentos, el polvo, detergentes, jabones y otros productos; para esto se utilizan parámetros de medida de la concentración orgánica de las aguas residuales. Uno de estos métodos se basa en la cantidad de carbono presente en los residuos; el cual se determina midiendo la cantidad de  $CO_2$  en donde carbono orgánico de la muestra se oxida por medio de un oxidante fuerte y comparándolo con la cantidad que generan un estándar de COT conocido. Otro

método se basa en la cantidad de oxígenos que se necesita para convertir el material oxidable en productos finales estables y como el oxígeno que se consume es proporcional al materia oxidable presente, sirve como una medida relativa de la concentración de las aguas residuales; los métodos más usuales para determinar las necesidades de oxígeno en las aguas residuales son las pruebas de DQO y DBO.

- El DQO\* se define como la cantidad de oxígeno necesario para oxidar químicamente las sustancias orgánicas presentes.
- El DBO\*\* se define como la cantidad de oxígeno que requieren los moos para degradar bilógicamente la materia orgánica de las aguas residuales por lo cual este es el parámetro más importante de la contaminación del agua.

### **4.3. NORMATIVIDAD VIGENTE AGUAS RESIDUALES**

El marco normativo vigente que relaciona el vertimiento de residuos líquidos a sistemas de alcantarillado, está reglamentado por el decreto 1594 de 1984 la cual trata del uso de agua y los residuos líquidos y fue expedido por los sectores de salud, agua potable y saneamiento básico, medio ambiente y específicamente en el servicio de alcantarillado, además el decreto 3930 de 2010 en el artículo 42 da los límites de vertimiento para empresas avícolas.

Mediante esta norma el código nacional de recursos naturales y código de saneamiento nacional, tratan lo relacionado a los usos del agua en el cual se establecieron límites de vertimiento de agua residual a cuerpos de agua (artículo 72) y alcantarillado público (artículo 73) y determinaron los límites de vertimiento de sustancia de interés sanitario y ambiental (artículo 74), los permisos de

---

\* Demanda química de oxígeno

\*\* Demanda bioquímica de oxígeno

vertimiento, estudios de impacto ambiental y procesos sancionatorios. A continuación se muestran con más detalladamente cada uno de estos artículos.

Los artículos siguientes fueron tomados del decreto 1594 de 1984 usos del agua y residuos líquidos capítulo VI De las normas de vertimiento.

Artículo 72: todo vertimiento a un cuerpo de agua deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas tabla 2:

Tabla 2. Normas que deben cumplir todo vertimiento a un cuerpo de agua

<b>Referencia</b>	<b>Usuario existente</b>	<b>Usuario nuevo</b>
<b>PH</b>	5-9 unidades	5-9 unidades
<b>Temperatura</b>	<40 °C	<40 °C
<b>Material flotante</b>	Ausente	Ausente
<b>Grasas y aceites</b>	Remoción > 80% en carga	Remoción > 80% en carga
<b>Solidos suspendidos, domésticos o industriales</b>	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
<b>Demanda bioquímica de oxígeno: desechos domésticos</b>	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga

<b>Demanda bioquímica de oxígeno: industriales</b>	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga
<b>carga máxima permisible(CMP), de acuerdo con lo establecido en los artículos 74 y 75 del decreto</b>		

Fuente: tomada decreto 1594 de 1984 usos del agua y residuos líquidos, pág. 19

Artículo 73: Todo vertimiento a un alcantarillado público deberá cumplir, por lo menos, con las siguientes normas tabla 3 y tabla 4:

Tabla 3. Normas que deben cumplir todo vertimiento a un alcantarillado público

<b>Referencia</b>	<b>valor</b>
<b>PH</b>	5-9 unidades
<b>Temperatura</b>	<40 °C
<b>Ácidos, bases o soluciones acidas o básicas que puedan causar contaminación; sustancias explosivas o inflamables.</b>	Ausente
<b>Solidos sedimentables</b>	10 ml/l

<b>Sustancias solubles en hexano</b>	100 mg/l
--------------------------------------	----------

Fuente: tomada decreto 1594 de 1984 usos del agua y residuos líquidos, pág. 20

Tabla 4. Normas que deben cumplir todo vertimiento a un alcantarillado público

<b>Referencia</b>	<b>Usuario existente</b>	<b>Usuario nuevo</b>
<b>Sólidos suspendidos, domésticos o industriales</b>	Remoción > 50% en carga	Remoción > 80% en carga
<b>Demanda bioquímica de oxígeno: desechos domésticos</b>	Remoción > 30% en carga	Remoción > 80% en carga
<b>Demanda bioquímica de oxígeno: industriales</b>	Remoción > 20% en carga	Remoción > 80% en carga
<b>Caudal máximo</b>	1.5 veces el caudal	promedio horario
<b>Carga máxima permisible(CMP), de acuerdo con lo establecido en los artículos 74 y 75 del decreto</b>		

Fuente: tomada decreto 1594 de 1984 usos del agua y residuos líquidos, pág. 20

Artículo 74: las concentraciones para el control de la carga de las siguientes sustancias de interés sanitario, son tabla 5:

Tabla 5. Las concentraciones para el control de la carga de las siguientes sustancias de interés sanitario.

<b>Sustancias</b>	<b>expresada como</b>	<b>concentración (mg/l)</b>
<b>arsénico</b>	As	0.5
<b>Bario</b>	Ba	5.0
<b>cadmio</b>	Cd	0.1
<b>cobre</b>	Cu	3.0
<b>cromo</b>	Cr+6	0.5
<b>compuestos fenólicos</b>	fenol	0.2
<b>mercurio</b>	Hg	0.02
<b>níquel</b>	Ni	2.0
<b>plata</b>	Ag	0.5
<b>plomo</b>	Pb	0.5
<b>selenio</b>	se	0.5
<b>Cianuro</b>	CN	1.0
<b>Difenil policlorados</b>	Concentración de agente activo	No detectable
<b>mercurio orgánico</b>	Hg	No detectable
<b>Tricloroetileno</b>	Tricloroetileno	1.0
<b>Cloroformo</b>	Extracto de carbón cloroformo(ECC)	1.0
<b>tetracloruro de carbono</b>	tetracloruro de carbono	1.0
<b>Dicloroetileno</b>	Dicloroetileno	1.0
<b>Sulfuro de carbono</b>	Sulfuro de carbono	1.0
<b>otros compuestos organoclorados, cada variedad</b>	Concentración de agente activo	0.05

<b>Compuestos organofosfatos, cada variedad</b>	agente activo	0.1
<b>carbonatos</b>		0.1

Fuente: tomada decreto 1594 de 1984 usos del agua y residuos líquidos, pág. 21

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 Adóptense las siguientes convenciones:

*A*: Carga de control,  $\left[\frac{kg}{día}\right]$

*Q*: Caudal promedio del vertimiento,  $\left[\frac{l}{seg}\right]$

*B*: Carga en el vertimiento,  $\left[\frac{kg}{día}\right]$

*CDC*: Concentración de control,  $\left[\frac{mg}{l}\right]$

*CV*: Concentración en el vertimiento,  $\left[\frac{mg}{l}\right]$

**0.0864**: Factor de conversión

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

Con los artículos anteriores en la tabla 6 se puede concluir:

:

Tabla 6. Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y red de alcantarillado público.

PARAMETRO	EXPRESADA COMO	NORMA (mg/l)
<b>DBO5 (demanda química de oxígeno)</b>	(mg/l)	1000
<b>DQO</b>	(mg/l)	2000
<b>Grasas y aceites</b>	(mg/l)	100
<b>PH</b>	unidades	05-sep
<b>Solidos sedimentables</b>	SS (mg/l)	2.0
<b>Solidos suspendidos Totales</b>	SST (mg/l)	800
<b>Temperatura</b>	grados centígrados	< 30 °C

Fuente: Análisis de la normatividad ambiental colombiana para el vertimiento de aguas residuales al sistema alcantarillado público. Elsa victoria Carvajal jaimes.2008 pag.48-49

A continuación en la tabla 7 muestra los límites a alcantarillado público en empresas avícolas según el decreto 3930 de 2010

Tabla 7. Concentraciones permisibles alcantarillado publico decreto 3930 de 2010

variable	Norma 3930 valores límites máximos permisibles alcantarillado publico	Resultados utilizando el prototipo de evaporación al vacío	Unidades
<b>Cloruros</b>	500	2	mg Cl/L
<b>Nitrógeno total</b>	40	27,16	mg N/L
<b>Sulfatos</b>	500	<5	mg SO4/L
<b>Fosforo total</b>	5	0,11	mg P/L
<b>DQO</b>	800	226	mg O2/L
<b>DBO5</b>	500	131	mg O2/L
<b>Grasa y aceites</b>	80	36,3	mg /L
<b>Solidos sedimentables</b>	5	<0,1	mg /L
<b>Solidos suspendidos totales</b>	200	<10	mg /L

Fuente: Análisis de la normatividad ambiental colombiana 3930 de 2010 para el vertimiento de aguas residuales al sistema alcantarillado público.

## **5. TIPOS DE TRATAMIENTOS, SEGÚN EL CONTAMINANTE QUE CONTENGA EL AGUA RESIDUAL INDUSTRIAL.**

Las aguas contaminadas provienen de diferentes procesos tanto industrias como zonas habitacionales, por lo que están compuestas de partículas muy variadas; de esta manera antes de realizar cualquier tratamiento se debe tener la suficiente información acerca de la calidad del agua disponible y exigida en el proceso. Los tipos de tratamiento se puede clasificar de la siguiente manera:

- Tratamientos para la eliminación de solidos suspendidos
- Tratamientos para la eliminación de materia disuelta.
- Tratamientos biológicos

A continuación se describen con detalle los tratamientos anteriormente nombrados

### **5.1. TRATAMIENTOS PARA LA ELIMINACIÓN DE SOLIDOS SUSPENDIDOS**

La materia en suspensión puede ser de muy diversa índole, desde partículas de varios centímetros y muy densas (normalmente inorgánicas), hasta suspensiones coloidales muy estables y con tamaños de partícula de hasta unos pocos nanómetros (normalmente de naturaleza orgánica).

La eliminación de esta materia en suspensión se suele hacer mediante operaciones mecánicas. Sin embargo, en muchos casos, y para favorecer esa separación, se utilizan aditivos químicos, denominándose en este caso tratamientos químico-físicos.

A continuación se nombran las operaciones unitarias más habituales.

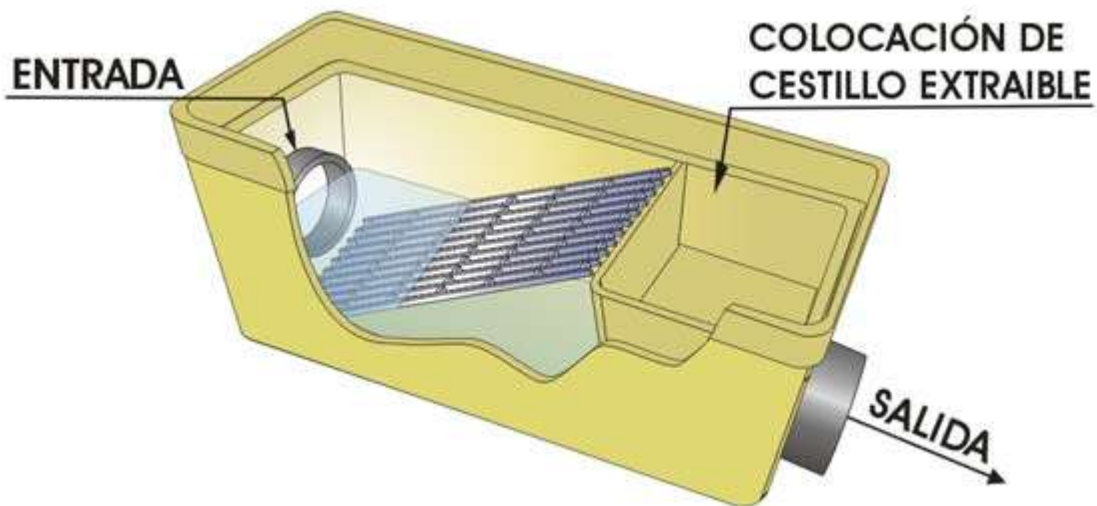
- Desbaste
- Sedimentación

- Filtración
- Flotación
- Coagulación

La utilización de una u otra es función de las características de las partículas (tamaño, densidad, forma, etc.) así como de la concentración de las mismas como como se explica a continuación.

**5.1.1 Desbaste.** Es una operación en la que se trata de eliminar sólidos de mayor tamaño que habitualmente tienen las partículas que arrastran las aguas. El objetivo es eliminarlos y evitar que dañen equipos posteriores del resto de tratamientos. Suele ser un tratamiento previo a cualquier otro.

Figura 5. Reja de desbaste manual



Fuente: BUPOLSA. Arquetas de desbaste. (en línea). [Madrid, España] Disponible en Internet: <http://www.bupolsa.com/depu/ar.html>

En la figura 5 se observa el equipo que se suele utilizar el cual está conformado por rejillas por las que se hace circular el agua, construidas por barras metálicas de 6 o más mm, dispuestas paralelamente y espaciadas entre 10 y 100 mm. Se limpian con rastrillos que se accionan normalmente de forma mecánica.

En otros casos, si el tipo de sólidos lo permite, se utilizan trituradoras, reduciendo el tamaño de sólidos y separándose posteriormente por sedimentación u otras operaciones.<sup>4</sup>

**5.1.2 Sedimentación.** Operación física en la que se aprovecha la fuerza de la gravedad que hace que una partícula más densa que el agua tenga una trayectoria descendente, depositándose en fondo del sedimentado. Esta operación será más eficaz cuanto mayor sea el tamaño y la densidad de las partículas a separar del agua, es decir, cuanto mayor sea su velocidad de sedimentación, siendo el principal parámetro de diseño para estos equipos. A esta operación de sedimentación se le suele denominar también decantación.

Realmente, este tipo de partículas (grandes y densas, como las arenas) se tienen en pocas ocasiones en aguas industriales. Lo habitual es encontrar sólidos poco densos, por lo que es necesario, para hacer más eficaz la operación, llevar a cabo una coagulación-floculación previa, que como se explicará más adelante, consiste en la adición de ciertos reactivos químicos para favorecer el aumento del tamaño y densidad de las partículas<sup>5</sup>.

---

<sup>4</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Antonio, et al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales [en línea]. Madrid (España): 2006.p.18

<sup>5</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit, p.19.

**5.1.3 Filtración.** La filtración es una operación en la que se hace pasar el agua a través de un medio poroso, con el objetivo de retener la mayor cantidad posible de materia en suspensión. El medio poroso tradicionalmente utilizado es un lecho de arena, de altura variable, dispuesta en distintas capas de distinto tamaño de partícula, siendo la superior la más pequeña y de entre 0.15 y 0.3 mm. Es una operación muy utilizada en el tratamiento de aguas potables, así como en el tratamiento de aguas para reutilización, para eliminar la materia en suspensión que no se ha eliminado en anteriores operaciones (sedimentación). En aguas industriales hay más variedad en cuanto al material filtrante utilizado, siendo habitual el uso de Tierra de Diatomeas. También es habitual, para mejorar la eficacia, realizar una coagulación-floculación previa.

**5.1.4. Flotación.** Operación física que consiste en generar pequeñas burbujas de gas (aire), que se asociarán a las partículas presentes en el agua y serán elevadas hasta la superficie, de donde son arrastradas y sacadas del sistema. Obviamente, esta forma de eliminar materia en suspensión será adecuada en los casos en los que las partículas tengan una densidad inferior o muy parecida a la del agua, así como en el caso de emulsiones, es decir, una dispersión de gotas de un líquido inmiscible, como en el caso de aceites y grasas. En este caso las burbujas de aire ayudan a “flotar” más rápidamente estas gotas, dado que generalmente la densidad de estos líquidos es menor que la del agua.

En esta operación hay un parámetro importante a la hora del diseño: La relación aire/sólidos, ml/l de aire liberados en el sistema por cada mg/l de concentración de sólidos en suspensión contenidos en el agua a tratar. Es un dato a determinar experimentalmente y suele tener un valor óptimo comprendido entre 0.005 y 0.06.

En el tratamiento de aguas se utiliza aire como agente de flotación, y en función de cómo se introduzca en el líquido<sup>6</sup>.

**5.1.5 Coagulación.** En la coagulación, se agrega una sustancia al agua para cambiar el comportamiento de las partículas en suspensión. Hace que las partículas, que anteriormente tendían a repelerse unas de otras, sean atraídas las unas a las otras o hacia el material agregado<sup>7</sup>.

## **5.2. TRATAMIENTOS PARA LA ELIMINACIÓN DE MATERIA DISUELTA.**

La materia disuelta puede tener grandes cantidades de sales Inorgánicas disueltas (salmueras) orgánicas (materia orgánica biodegradable en industria de alimentación) hasta extremadamente pequeñas cantidades de inorgánicos (metales pesados) y orgánicos (pesticidas) pero necesaria su eliminación dado su carácter peligroso. En seguida se nombran algunos tratamientos para la eliminación de materia disuelta

- Precipitación
- Procesos Electroquímicos
- Intercambio Iónico
- Adsorción
- Desinfección

Los cuales se describen a continuación.

---

<sup>6</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.21.

<sup>7</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.22.

**5.2.1 Precipitación.** Consiste en la eliminación de una sustancia disuelta indeseable, por adición de un reactivo que forme un compuesto insoluble con el mismo, facilitando así su eliminación por cualquiera de los métodos descritos en la eliminación de la materia en suspensión.

La precipitación se utiliza más para describir procesos como la formación de sales insolubles, o la transformación química de un ión en otro con mayor o menor estado de oxidación que provoque la formación de un compuesto insoluble<sup>8</sup>.

**5.2.2 Procesos Electroquímicos.** Está basado en la utilización de técnicas electroquímicas, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del agua (que necesariamente ha de contener un electrolito) y provocando reacciones de oxidación-reducción tanto en el cátodo como en el ánodo. Por tanto se utiliza energía eléctrica como vector de descontaminación ambiental, siendo su coste uno de las principales desventajas de este proceso. Sin embargo como ventajas cabe destacar la versatilidad de los equipos, la ausencia tanto de la utilización de reactivos como de la presencia de fangos y la selectividad, pues controlar el potencial del electrodo permite seleccionar la reacción electroquímica dominante deseada. la aplicación que está tomando un auge importante en el tratamiento de aguas residuales industriales, a través de una oxidación o reducción directa<sup>9</sup>.

**5.2.3 Intercambio Iónico.** Es una operación en la que se utiliza un material, habitualmente denominado resinas de intercambio iónico, que es capaz de retener selectivamente sobre su superficie los iones disueltos en el agua, los mantiene temporalmente unidos a la superficie, y los cede frente a una disolución con un fuerte regenerante.

---

<sup>8</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.24.

<sup>9</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.24.

La aplicación habitual de estos sistemas, es por ejemplo, la eliminación de sales cuando se encuentran en bajas concentraciones, siendo típica la aplicación para la desmineralización y el ablandamiento de aguas, así como la retención de ciertos productos químicos y la desmineralización de jarabes de azúcar<sup>10</sup>.

**5.2.4 Adsorción.** El proceso de adsorción consiste en la captación de sustancias solubles en la superficie de un sólido. Un parámetro fundamental en este caso será la superficie específica del sólido, dado que el compuesto soluble a eliminar se ha de concentrar en la superficie del mismo. La necesidad de una mayor calidad de las aguas está haciendo que este tratamiento esté en auge. Es considerado como un tratamiento de refinado, y por lo tanto al final de los sistemas de tratamientos más usuales, especialmente con posterioridad a un tratamiento biológico<sup>11</sup>.

**5.2.5 Desinfección.** La desinfección pretende la destrucción o inactivación de los microorganismos que puedan causarnos enfermedades, En el caso de aguas residuales industriales, el objetivo puede ser no solo desactivar patógenos, sino cualquier otro organismo vivo, si lo que se pretende es reutilizar el agua.

Fundamentalmente se utilizan agentes oxidantes, entre los que cabe destacar el clásico Cl<sub>2</sub> y algunos de sus derivados, La utilización de desinfectantes persigue tres finalidades: producir agua libre de patógenos u organismos vivos, evitar la producción de subproductos indeseables de la desinfección y mantener la calidad bacteriológica en la red conducción posterior<sup>12</sup>.

---

<sup>10</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.26.

<sup>11</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.27.

<sup>12</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.28.

### **5.3. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS.**

Constituyen una serie de importantes procesos de tratamiento que tienen en común la utilización de microorganismos (entre las que destacan las bacterias) para llevar a cabo la eliminación de componentes indeseables del agua, aprovechando la actividad metabólica de los mismos sobre esos componentes. La aplicación tradicional consiste en la eliminación de materia orgánica biodegradable, tanto soluble como coloidal, así como la eliminación de compuestos que contienen elementos nutrientes (N y P). Es uno de los tratamientos más habituales, para las aguas industriales. Además, tiene una importante incidencia en las posibilidades de aplicación al tratamiento de aguas. Atendiendo a cual es dicho aceptor de electrones distinguimos tres casos:

- Procesos biológicos aerobios
- Procesos aerobios con biomasa soportada
- Procesos biológicos de eliminación de nutrientes

**5.3.1 Procesos biológicos aerobios.** Podemos definir los “Procesos Biológicos Aerobios”, como aquellos realizados por determinado grupo de microorganismos (principalmente bacterias y protozoos) que en presencia de Oxígeno, actúan sobre la materia orgánica e inorgánica disuelta, suspendida y coloidal existente en el agua residual, transformándola en gases y materia celular, que puede separarse fácilmente mediante sedimentación.

**5.3.1.1 Fangos activados.** Consiste en poner en contacto en un medio aerobio, normalmente en una balsa aireada, el agua residual con flóculos biológicos previamente formados, en los que se absorbe la materia orgánica y donde es

degradada por las bacterias presentes. Junto con el proceso de degradación, y para separar los flóculos del agua, se ha de llevar a cabo una sedimentación, donde se realiza un recirculación de parte de los fangos, para mantener una elevada concentración de microorganismos en el interior de reactor, además de una purga equivalente a la cantidad crecida de organismos.

**5.3.2 Procesos aerobios con biomasa soportada.** Otra de las formas para conseguir concentraciones suficientes de microorganismos, sin necesidad de recirculación, es favoreciendo su crecimiento en la superficie de sólidos.

Se evitan de esta forma los posibles problemas en la sedimentación y recirculación de fangos, frecuente en los procesos clásicos de fangos activados. Sin embargo el aporte de oxígeno será de nuevo un factor importante, consiguiéndose en este caso bien en la distribución del líquido, bien por movimiento del sistema<sup>13</sup>.

**5.3.2.1 Procesos biológicos anaerobio.** El tratamiento anaerobio es un proceso biológico ampliamente utilizado en el tratamiento de aguas residuales. Cuando éstas tienen una alta carga orgánica, se presenta como única alternativa frente al que sería un costoso tratamiento aerobio, debido al suministro de oxígeno. Es un proceso en el que pueden intervenir diferentes tipos de microorganismos pero que está dirigido principalmente por bacterias. El tratamiento anaerobio se caracteriza por la producción del denominado “biogás”, formado fundamentalmente por metano (60-80%) y dióxido de carbono (40-20%) y susceptible de ser utilizado como combustible para la generación de energía térmica y/o eléctrica. Además, solo una pequeña parte de la DQO tratada (5-10%) se utiliza para formar nuevas bacterias, frente al 50-70% de un proceso aerobio. Ello implica que sólo una pequeña fracción del residuo orgánico biodegradable es transformada en nuevas

---

<sup>13</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.34.

células, la mayor parte es convertida en metano, un gas combustible, lo que lo convierte en un producto final útil. Esto significa que se tiene una menor acumulación de lodo producido por el proceso de digestión anaeróbica. Sin embargo, la lentitud del proceso anaerobio obliga a trabajar con altos tiempos de residencia, por lo que es necesario diseñar reactores o digestores con una alta concentración de microorganismos.

**5.3.3 Procesos biológicos de eliminación de nutrientes.** Otra de las aplicaciones de los tratamientos biológicos es la eliminación de nutrientes, es decir, de compuestos que contienen tanto nitrógeno como fósforo.

**5.3.3.1 Tratamiento biológico de compuestos con nitrógeno.** Los compuestos con nitrógeno sufren una serie de transformaciones como consecuencia de la acción de distintos organismos. En primer lugar, una serie de bacterias autótrofas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) son capaces de llevar a cabo una nitrificación, con demanda de oxígeno. A continuación, otra serie de bacterias desnitrificantes llevan a cabo la eliminación de  $\text{NO}_3$ , en un sistema anóxico, donde el propio nitrato actúa de aceptor de electrones, siendo en este caso bacterias heterótrofas, es decir su fuente de carbono es materia orgánica. Este proceso en su conjunto es conocido como nitrificación-desnitrificación. De esta forma y en dos reactores consecutivos se puede llevar a cabo la eliminación de compuestos con nitrógeno.

**5.3.3.2 Eliminación Biológica del Fósforo.** Los métodos están basados en someter inicialmente a la masa bacteriana a un ambiente anaerobio, donde los microorganismos parece que tienen tendencia a no consumir fósforo para el crecimiento debido a la presencia de ácido acético. Sin embargo, si

posteriormente son sometidos a un sistema aerobio, consumen con “avidez” fósforo, momento en el que se sedimentan y separan<sup>14</sup>.

---

<sup>14</sup> RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Op.cit,p.43.

## **6. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES POR EVAPORACIÓN AL VACÍO**

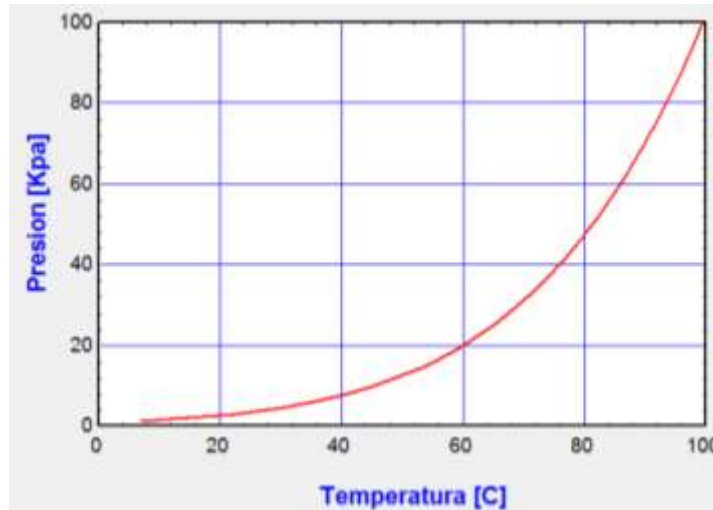
Debido a que las normas en cuanto a los vertimientos de las industrias cada vez son más exigentes, se necesitan nuevas propuestas para los tratamientos de aguas residuales; una de las propuestas es la evaporación al vacío, la cual es un método de tratamiento de aguas residuales altamente efectivo, porque, en teoría, se pueden separar completamente todas las especies disueltas (favorables, peligrosas y tóxicas) del agua, produciendo un sólido estable que puede ser depositado en un vertedero. El agua que se evapora en el evaporador puede recuperarse normalmente y reutilizarse en otro proceso dentro de la planta. Contribuyendo enormemente a la protección sostenible de nuestras fuentes de agua dulce y, a su vez, contribuyen con un futuro limpio y digno.

### **6.1. EVAPORACIÓN AL VACÍO.**

La evaporación al vacío consiste en reducir la presión del interior del evaporador por debajo de la presión atmosférica. Este hecho nos permite hervir el agua residual mediante la aplicación de la energía suficiente para provocar la ebullición a baja temperatura, como lo podemos observar en la figura 6. No solamente permite evaporar sin un costo energético muy elevado sino que además el agua después condensada sale con una calidad inmejorable y en la mayor parte de los casos es reutilizable en muchas aplicaciones.

Este proceso se lleva a cabo mediante la aplicación de energía suficiente para provocar la ebullición lo cual nos permite la separación de dos o más líquidos que se encuentran mezclados o de un soluto y un disolvente debido a que al encontrarse permiten reducir la temperatura de ebullición del líquido a evaporar, lo que reduce la cantidad de calor a utilizar en el proceso de ebullición y condensación.

Figura 6. Punto de ebullición del agua en función de la presión de vapor.



## 6.2. VENTAJAS DE EVAPORACIÓN A VACÍO.

- Hay que destacar que una de las ventajas más grandes que tiene la evaporación al vacío es que en su gran mayoría el agua evaporada puede ser reutilizada obteniendo un ahorro económico y erradicando la generación de vertido industrial.
- Pueden tratar efluentes más complejos.
- Diseño flexible y compacto de las maquinas.
- Compacidad y robustez
- Muy práctico para tratar bajas cantidades de agua residual
- Representa un ahorro energético muy importante con respecto a la evaporación atmosférica.
- Es una tecnología de fácil uso y requiere poco mantenimiento.
- Alta reducción y concentración de los residuos líquidos.

### 6.3.DIFERENTES COMPONENTES DE SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS INDUSTRIALES.

El sistema de evaporación al vacío tiene diferentes componentes las cuales en figura 7 se muestran con su respectiva clasificación.

Figura 7. Clasificación de los evaporadores al vacío según sus componentes



A continuación se describen con mayor profundidad los diferentes componentes que constituyen un sistema de evaporación al vacío.

**6.3.1 Fuente de energía térmica.** La energía térmica es la forma de energía que interviene en los fenómenos caloríficos. Cuando dos cuerpos a diferentes temperaturas se ponen en contacto, el caliente comunica energía al frío; el tipo de energía que se cede de un cuerpo a otro como consecuencia de una diferencia de temperaturas es precisamente la energía térmica.

**6.3.1.1 Fuentes de energía térmica Residual.** Debido a que las energías térmicas residuales son unos de los recursos energéticos con mayor disponibilidad en el mundo se pueden usar como beneficios para los sistemas de evaporación al vacío algunos de estos sistemas son:

- Gases de chimeneas
- Vapores residuales

**6.3.1.2 Fuente de energía térmica Convencional.** Se denomina así a todas las energías que son de uso frecuente en el mundo o que son las fuentes más comunes para producir energía eléctrica en otras ocasiones, se utiliza la combustión del carbón, el petróleo o el gas natural, cuyo origen son los elementos fósiles, que les sirve como combustible para calentar el agua y convertirlo en vapor. Algunas de estas fuentes de energía térmica convencional son:

- **Resistencia eléctrica**

La resistencia eléctrica como la que se observa en la figura 9 es muy utilizada para el calentamiento de aguas, estas están diseñadas para el calentamiento en

contacto directo con el fluido dado que todo el calor se genera dentro del líquido, se alcanza un rendimiento energético máximo.

Figura 8. Resistencia eléctrica para tubería



Fuente: JCD. Especializados en la fabricación de resistencias eléctricas. Resistencias tipo tubulares para uso en inmersión. (en línea). [Lima, Peru] Disponible en Internet: <http://jcdresistencias.galeon.com/resist4.htm>

- **Gases de combustión**

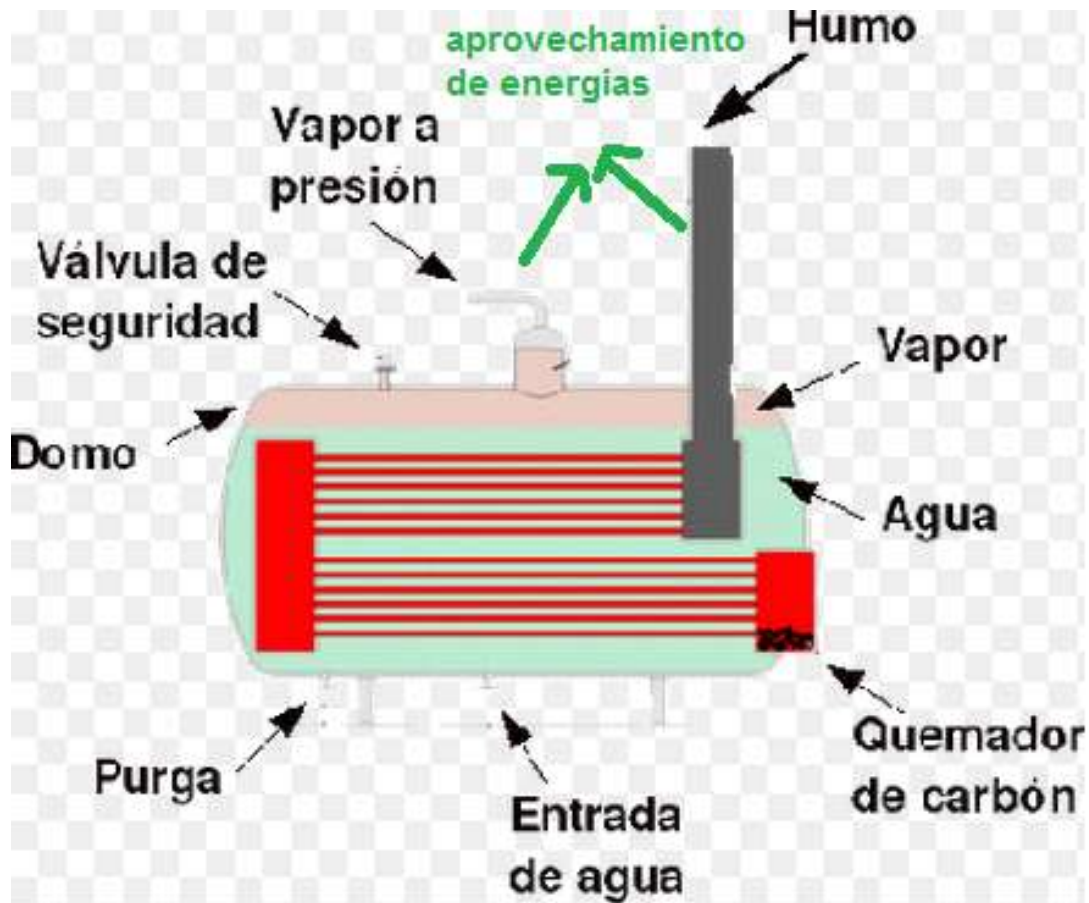
Los gases de combustión son el resultado de las materias combustibles, como gasolina/petróleo, Diesel o carbón. Las combustiones localizadas y controladas, se descargan a la atmósfera a través de una tubería o chimenea. Estos gases de combustión que se generan por ejemplo en las calderas pueden ser utilizados para el calentamiento del sistema de evaporación al vacío siendo esta una energía sin costo alguno.

- **Vapor**

Además de aprovechar los gases de combustión existen vapores residuales en algunos procesos industriales como en lugares donde se utilizan calderas (figura

9) que podría generar la energía necesaria para el proceso de calentamiento del agua residual para la evaporación al vacío.

Figura 9. Caldera y sus puntos de aprovechamiento



Fuente: TÉRMICOS. Calderas de vapor. (en línea). Disponible en Internet: <http://www.sabelotodo.org/termicos/caldera.html>

- **Bomba de calor**

En la figura 10 se muestra la bomba de calor que es una máquina termodinámica que permite a través del cambio de estado del líquido frigorífico, aprovechar la energía acumulada en el aire para calentar el agua existente en el depósito.

Figura 10. Bomba de calor para agua caliente sanitaria



Fuente: CONTRUMÁTICA. Construpedia. Componentes de la bomba de calor para agua caliente sanitaria. (en línea). [Barcelona, España] Disponible en Internet: [http://www.construmatica.com/construpedia/Componentes\\_de\\_la\\_Bomba\\_de\\_Calor\\_para\\_Agua\\_Caliente\\_Sanitaria](http://www.construmatica.com/construpedia/Componentes_de_la_Bomba_de_Calor_para_Agua_Caliente_Sanitaria)

**6.3.1.3 No convencional.** Se refiere aquellas formas de producir energía que no son muy comunes en el mundo y cuyo uso es muy limitado debido, a los costos para su producción y su difícil forma para captarlas y transformarlas en energía eléctrica. Entre las energías no convencionales tenemos: la energía solar, la energía eólica, la energía química u otras formas de energía que se pueden crear.

- **Colectores solares**

Usar la energía solar es una forma muy sencilla y accesible para poder calentar agua. Por lo cual los colectores solares (figura 11) pueden reducir algunos gastos energéticos y gastos incensarios en combustibles.

Figura 11. Colector Solar.



Fuente: OLMEDO. Fernando. Que es un colector solar o captador solar. (en línea) tipos de colectores solares. Disponible en Internet: <http://www.biodisol.com/destacado/que-es-un-colector-solar-o-captador-solar-tipos-de-colectores-solares-energia-solar-termica/>

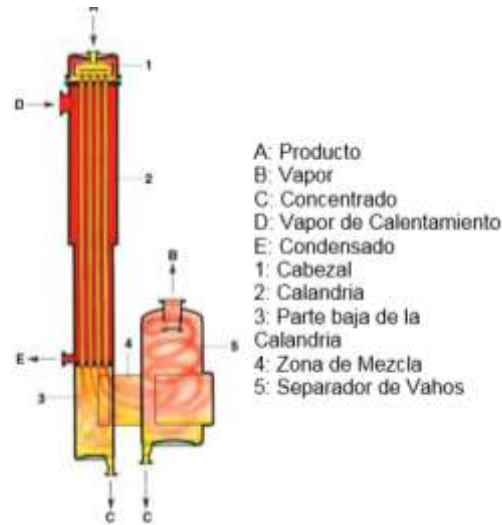
**6.3.2 Tipos de evaporador.** El evaporador es un intercambiador de calor en el cual se produce la transferencia de energía térmica desde un medio a ser enfriado hacia el fluido refrigerante que circula en el interior del dispositivo.

Existen múltiples diseños de evaporadores al vacío disponibles. Su elección depende de múltiples factores, tanto desde el punto de vista económico como operativo a continuación se nombras algunos de los tipos de evaporadores.

**6.3.2.1 Evaporadores de película descendente (de calandria).** En los evaporadores de película descendente (figura 12) el producto líquido (A) usualmente entra al evaporador por la parte superior (1) o cabezal del evaporador. En el cabezal, el producto es uniformemente distribuido dentro de los tubos de calentamiento. Una película fina entra a los tubos de calentamiento fluyendo hacia abajo, donde es calentada a temperatura de ebullición y así, es parcialmente evaporada. En la mayoría de los casos es usado vapor (D) para calentar el evaporador. El producto y los vahos, ambos fluyen hacia abajo en un flujo paralelo. Este movimiento de gravedad inducida hacia abajo es aumentado cada vez más por el flujo a contra corriente de vapor. La separación del producto

concentrado (C) forma su vapor (B) lo que se lleva a cabo en la parte baja del intercambiador de calor (3) y en el separador (5)<sup>15</sup>.

Figura 12. Evaporador de película descendente



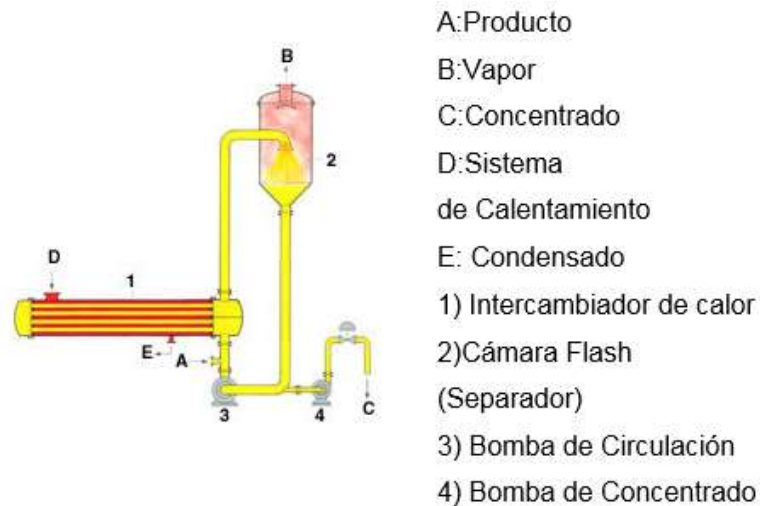
Fuente: GEA. Evaporadores de película descendente. En: [Process Engineering S.A de C.V](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp) (en línea). [Consultado 3 de feb.2014]. Disponible en internet: [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores\\_pelicula\\_descendente.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp)

**6.3.2.2 Evaporador de circulación forzada.** Los evaporadores de circulación forzada (figura 13) son empleados si se desea evitar la evaporación del producto sobre la superficie de calentamiento debido a las características de ensuciamiento del producto o para evitar la cristalización. La velocidad de flujo en los tubos debe ser alta y se requieren bombas de alta capacidad.

<sup>15</sup> Fuente: GEA. Evaporadores de película descendente. En: [Process Engineering S.A de C.V](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp) (en línea). [Consultado 3 de feb.2014]. Disponible en internet: [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores\\_pelicula\\_descendente.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp)

La circulación de producto es calentada cuando fluye a través del intercambiador de calor y entonces es parcialmente evaporada cuando la presión es reducida en la cámara flash (separador). El líquido producido es generalmente calentado solo unos cuantos grados por cada pasada a través del intercambiador de calor. Para mantener una buena transferencia de calor dentro del intercambiador es necesario tener un alto valor en el flujo de recirculación<sup>16</sup>.

Figura 13. Evaporador de circulación forzada



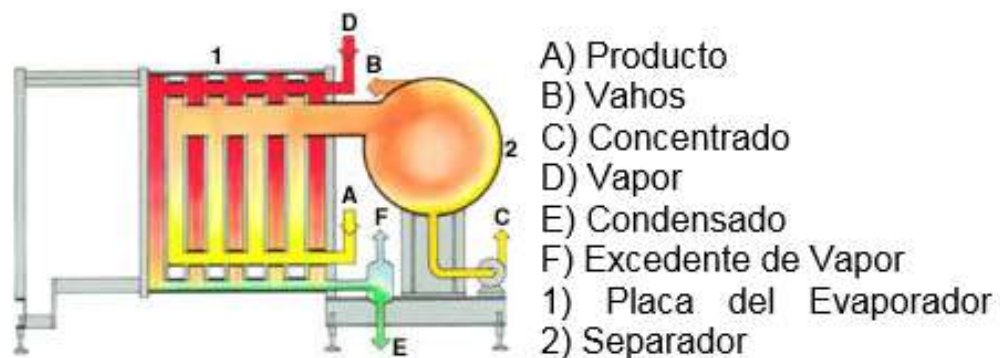
Fuente: GEA. Evaporadores de película descendente. En: [Process Engineering S.A de C.V](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp) (en línea). [Consultado 3 de feb.2014]. Disponible en internet: [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores\\_pelicula\\_descendente.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp)

**6.3.2.3 Evaporador de placas.** En lugar de intercambiadores de calor de coraza y tubos, un banco de placas (figura 14) puede ser utilizado como superficie de calentamiento. Este ensamble de placas es semejante a intercambiadores de calor de placas, pero son equipados con grandes espacios para el flujo de vapor. En

<sup>16</sup> G Fuente: GEA. Evaporadores de película descendente. En: [Process Engineering S.A de C.V](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp) (en línea). [Consultado 3 de feb.2014]. Disponible en internet: [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores\\_pelicula\\_descendente.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp)

estas unidades una placa para producto y una placa para vapor son conectadas alternadamente. El espacio para el producto es diseñado para una distribución uniforme de líquido sobre la superficie de la placa y una baja caída de presión en la fase de vapor.

Figura 14. Evaporador de placas



Fuente: GEA. Evaporadores de película descendente. En: [Process Engineering S.A de C.V](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp) (en línea). [Consultado 3 de feb.2014]. Disponible en internet: [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores\\_pelicula\\_descendente.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp)

Los evaporadores de placas son de diseño compacto. Los separadores son conectados directamente al paquete de placas con un ducto de interconexión corto. Así, los requerimientos de espacio requerido son bajos y así la altura del arreglo no excede los 10-13 ft (3-4m). Esto significa que los evaporadores de placas pueden ser instalados en muchos tipos de construcciones<sup>17</sup>.

<sup>17</sup>Fuente: GEA. Evaporadores de película descendente. En: [Process Engineering S.A de C.V](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp) (en línea). [Consultado 3 de feb.2014]. Disponible en internet: [http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores\\_pelicula\\_descendente.asp](http://www.gea-niro.com.mx/lo-que-suministros/evaporadores_pelicula_descendente.asp)

**6.3.3 Condensación.** El condensador es un intercambiador de calor que tiene como función condensar el vapor después de realizar un trabajo termodinámico; por ejemplo, una turbina de vapor o para condensar el vapor comprimido de un compresor de frío en un circuito frigorífico. La condensación se puede producir bien utilizando aire mediante el uso de un ventilador o con agua (esta última suele ser en circuito cerrado con torre de refrigeración, en un río o el mar)<sup>18</sup>

**6.3.3.1 Condensación por aire.** Los condensadores de aire son universalmente utilizados tanto en aplicaciones domésticas como en industriales. El aumento experimentado en su uso, frente a los de agua, se debe:

- Déficit de recursos hidráulicos, sobre todo en centros urbanos.
- Protección medioambiental.

Presentan dos inconvenientes principales frente a la condensación con agua:

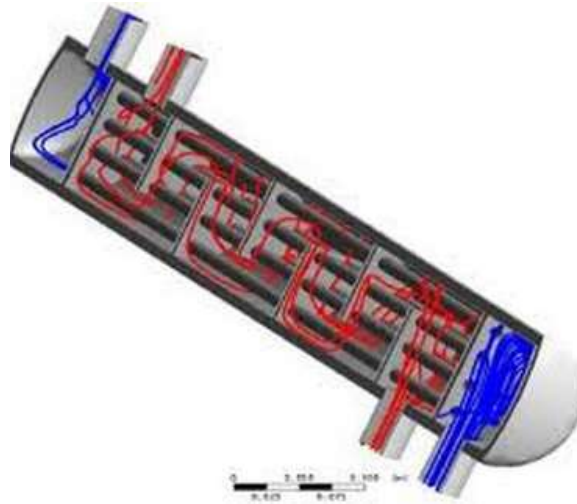
- Una mayor presión de condensación.
- Mayores niveles sonoros.

**6.3.3.2 Condensación por torre de enfriamiento.** Este subsistema está basado en el funcionamiento de un intercambiador de calor tipo carcasa y tubos al cual llega como fluido caliente el vapor obtenido en el equipo de evaporación al vacío ya separado de los sólidos y como fluido frío agua proveniente de una torre de enfriamiento un esquema de este equipo se muestra a continuación en la figura 15.

---

<sup>18</sup> ANONIMO. Condensador. En: wikipedia [en línea]. [Consultado 3 de feb.2014]. disponible [http://es.wikipedia.org/wiki/Condensador\\_\(termodin%C3%A1mica\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Condensador_(termodin%C3%A1mica))

Figura 15. esquema de un intercambiador de calor tipo carcaza y tubos



Fuente: RINCON DE LA TRANSFERENCIA. Diseño de intercambiador de calor. Enfriador de heptino líquido. (en línea). [Salamanca, España] Disponible en Internet: <http://sayanythingkikin.blogspot.com/2009/04/diseño-del-intercambiador-de-calor.html>

**6.3.4 Conservación del vacío.** Uno de los factores de mayor importancia es este sistema es la conservación de vacío, debido a que si este se conserva la mayor cantidad posible nos da una funcionamiento óptimo del sistema. Actualmente existen elementos que ayudan a logra la conservación del vacío como:

**6.3.4.1 Columna barométrica.** En los sistemas con columna barométrico es el medio más económico y confiable de condensar el vapor o proveniente de evaporadores, cristalizadores al vacío, cocinadores, sistemas de vacío y muchos otros equipos.

La característica sobresaliente de los sistemas con columna como los condensadores es que el agua de enfriamiento puede ser descargada por gravedad, sin necesidad de una bomba. Es un aparato de bajo costo, que no se inunda, fácil de instalar que requiere poco espacio y bajo mantenimiento.

**6.3.4.2 Bomba de vacío.** Las bombas de vacío son realmente compresores de aire que se encargan de extraer moléculas de gas de un volumen sellado, formando un vacío parcial, también llegan a extraer sustancias no deseadas en el producto, sistema o proceso los cuales son descargados a la atmosfera.

- **Bombas para producir vacío**

Las bombas que producen un vacío más profundo son las bombas de vacío rotativas de aceite de 2 etapas, como las mostradas en la figura 16. Estas bombas de vacío son capaces de reducir la presión en un deposito libre de fugas entre  $1 \text{ pa}$  ( $10^{-2} \text{ mbar}$ ) y  $0,1 \text{ Pa}$  ( $10^{-3} \text{ mbar}$ ). Consta de un cilindro fijo o estator con orificios de entrada y de salida como se muestra en la figura 17, dentro del cual gira otro cilindro excéntrico o rotor con palas extensible que, rozando sobre el estator, define dos cámaras de volúmenes variables. Cada medio giro del rotor genera dos etapas:

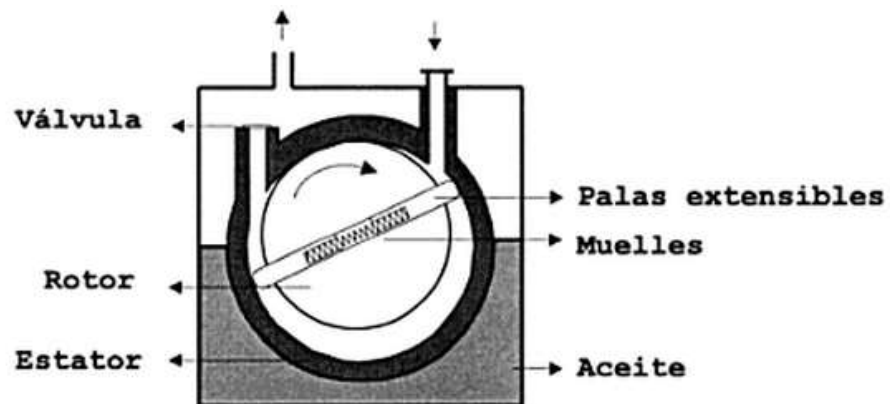
- La expansión, en la que se aumenta el volumen que se presenta al orificio de entrada por lo que es ocupado por el gas de la cámara anterior.
- La compresión, la pala extensible cierra la comunicación con el orificio de entrada y se procede a la disminución de volumen, con la consiguiente compresión del gas. Cuando el gas alcanza la presión necesaria para vencer la válvula de salida, comienza a salir al exterior hasta que se consume casi en su totalidad.

Figura 16. Bomba de vacío giratoria de dos etapas



Fuente: WHITMAN, William. JOHNSON, William. Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado. Aparatos domésticos y sistemas especiales Traducido por vuelapluma. España. 124 p. ISBN 0-8273-5646-3.

Figura 17. Esquema de una bomba rotativa de aceite



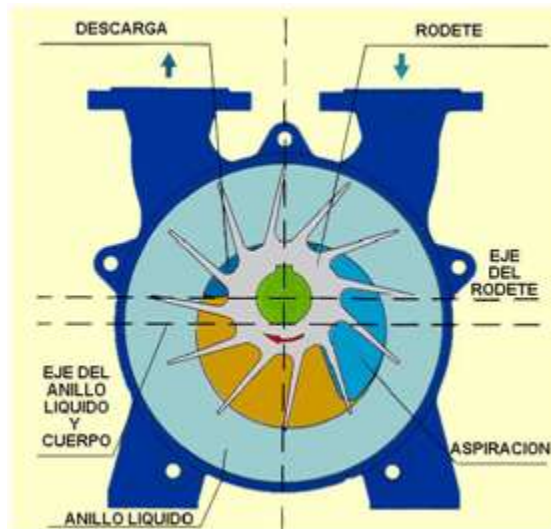
Fuente: ZAMORA, Manuel. Termo I. Un estudio de los sistemas termodinámicos. España. 509 p. ISBN 84-472-0455-3.

Para asegurar la estanqueidad de los volúmenes de trabajo se mantiene constantemente una capa de aceite entre los diversos componentes solidos que rozan. El aceite se encuentra en un depósito que rodea el estator y trata de inundarlo, aunque es constantemente expulsado junto con el gas a través de la válvula de salida<sup>19</sup>.

- **Bomba de vacío por recirculación de agua**

Bomba de vacío por recirculación de agua son las comúnmente llamadas de anillo se utiliza para vacío operacional limitado hasta 33-40 mbar a, dependiendo de la temperatura del líquido de anillo. Este tipo de bombas se suelen utilizar para manejar mezclas de gases que contienen vapores condensables.

Figura 18. Sección bomba de anillo líquido



Fuente: EQUIREPSA. Productos. Bomba de vacío. (en línea). [Madrid, España] Disponible en Internet: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni\\_03/u3c3s2.htm](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/cursos/uni_03/u3c3s2.htm)

---

<sup>19</sup> Fuente: ZAMORA, Manuel. Termo I. Un estudio de los sistemas termodinámicos. España. 509 p. ISBN 84-472-0455-3.

Cuando el rodete de la bomba de vacío gira, gracias a la fuerza centrífuga se forma un anillo líquido concéntrico en la periferia de la cubierta protectora que es la que realiza la compresión.

El montaje excéntrico del rodete con respecto a la cubierta como se muestra en figura 18, conduce a un aumento del espacio entre las paletas del rodete a la entrada del sistema y un reducido espacio a la salida del mismo. Cuando el gas entra, es encerrado entre las paletas del rodete y el anillo líquido. Cuando el rodete gira, el anillo líquido comprime el gas y lo impulsa hacia la salida del anillo.

El anillo líquido no solo actúa como sello, sino que también absorbe el calor de compresión, fricción y condensación. En principio, puede utilizarse cualquier líquido aunque suele usarse agua, aceite, glicol u otros líquidos que no se vaporicen a las condiciones del proceso.

Las ventajas de las bombas de anillo líquido son:

- Diseño más simple que la mayoría de otras bombas de vacío; solamente utilizan un sistema de rotación.
- Puede fabricarse de cualquier metal fundido.
- Pequeños ruidos y vibración.
- Muy pequeño incremento en la temperatura del gas de descarga.
- Puede manejar cargas de gases condensables.
- No se produce ningún tipo de deterioro debido al líquido o pequeñas partículas que puedan entrar con el fluido de proceso.
- Velocidad de giro pequeña (1800 r.p.m. o menor), que maximiza la duración del proceso.
- Se puede poner en funcionamiento o parar continuamente.

- Puede utilizarse cualquier tipo de líquido como líquido sellante, en situaciones donde es posible la mezcla con el vapor del proceso<sup>20</sup>

**6.3.4.3 Eyector.** Los eyectores son aparatos de chorro no cuentan con partes móviles, que utilizan fluidos en movimiento bajo condiciones controladas y que descargan a una presión intermedia entre las presiones del fluido motor y de succión. El eyector a chorro de vapor es el aparato más simple que hay para extraer el aire, gases o vapores de los condensadores y de los equipos que operan a vacío en los procesos industriales. Es un tipo simplificado de bomba de vacío o compresor, sin partes móviles, como válvulas, pistones, rotores, etc. Su funcionamiento está dado por el principio de conservación de la cantidad de movimiento de las corrientes involucradas.

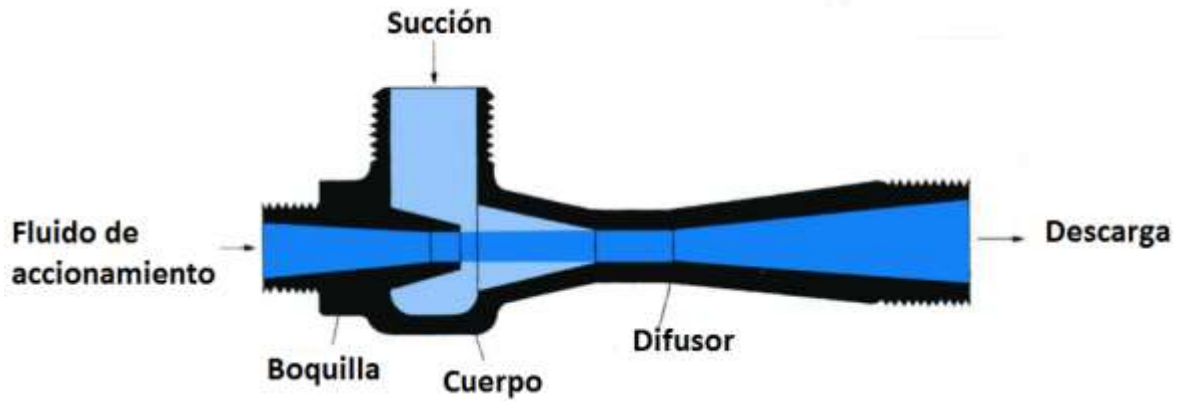
Los eyectores o bombas de chorros, son máquinas cuyo trabajo se basa en la transmisión de energía por impacto de un chorro fluido a gran velocidad, contra otro fluido en movimiento o en reposo, para proporcionar una mezcla de fluido a una velocidad moderadamente elevada, que luego disminuye hasta obtener una presión final mayor que la inicial del fluido de menor velocidad como se muestra en la figura 19. Los eyectores se emplean muy comúnmente para extraer gases de los espacios donde se hace vacío, por ejemplo, en los condensadores, en los sistemas de evaporación, en torres de destilación al vacío y en los sistemas de refrigeración, donde los gases extraídos son generalmente incondensables, tales como el aire.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> EQUIREPSA. Productos. Bomba de vacío. (en línea). [Madrid, España] Disponible en Internet: [http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni\\_03/u3c3s2.htm](http://aulavirtual.usal.es/aulavirtual/demos/simulacion/modulos/curso/uni_03/u3c3s2.htm)

<sup>21</sup> ANONIMO. Eyectores. En: monografías [en línea]. [Consultado 15 de may.2014]. disponible <http://www.monografias.com/trabajos10/eyec/eyec.shtml>

Figura 19. Sección transversal típica del eyector



Fuente: NORTHVALEKORTING. Venturi. Fluid jet. (en línea) how it work. Disponible en Internet: <http://www.northvalekorting.co.uk/prod-fluidjet.asp>

## 7. BASES TEÓRICAS

Para el desarrollo y diseño de un sistema con evaporación al vacío para la depuración de aguas residuales, es de vital importancia conocer los principios teóricos que rigen dicho fenómeno los cuales se nombran a continuación.

### 7.1. CONVECCIÓN INTERNA FORZADA.

En la convección forzada se fuerza el fluido a fluir por medio de una bomba o ventilador, se transportan en su mayoría por tubos circulares, debido a que los tubos con sección transversal circular pueden soportar grandes diferencias de presión entre el interior y el exterior sin sufrir distorsión, además el tubo circular proporciona transferencia de calor para la menor caída de presión, lo cual explica la popularidad de los tubos circulares en los equipos de transferencia de calor.

**7.1.1 Análisis térmico.** La ecuación de energía para el flujo estacionario de un fluido en un tubo en ausencia de cuales quiera iteraciones de trabajo (como el calentamiento mediante resistencia) está expresada como:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_e - T_i) \text{ [w]}$$

Dónde:

$T_e$ = Temperatura de salida

$T_i$ = temperatura de entrada

$Q$ =Razón de transferencia de calor hacia el fluido o desde este.

**7.1.2 Flujo turbulento en tubos.** El flujo de los fluidos sigue líneas de corriente y, como consecuencia, es laminar a velocidades bajas, pero se vuelve turbulento conforme se incrementa la velocidad más allá del valor crítico. La transición de flujo laminar a turbulento no ocurre de manera repentina; más bien, se presenta sobre algún intervalo de velocidad, donde el flujo fluctúa entre lo laminar y turbulento. El flujo laminar se encuentra cuando los fluidos intensamente viscosos, como los aceites, fluyen en tubos de diámetro pequeño o pasos angostos.

Para el flujo en un tubo circular, el número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\rho * V_{prom} * D}{\mu} = \frac{V_{prom} * D}{\nu}$$

**Dónde:**

$V_{prom}$  = velocidad promedio del flujo,  $\left[\frac{m}{s}\right]$

$D$  = Diámetro del tubo,  $[m]$

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  = viscosidad cinemática del fluido,  $\left[\frac{m}{s}\right]$

El flujo turbulento se utiliza de manera común en la práctica debido a los coeficientes más altos de transferencia de calor asociados con él. La mayor parte de las correlaciones para los coeficientes de fricción y de transferencia de calor en el fluido turbulento se basa en estudios experimentales debido a la dificultad para tratar en forma teórica con este tipo de flujo.

Para tubos lisos, el factor de fricción en flujo turbulento se puede determinar a partir de la primera ecuación de Petukhov explícita (Petukhov 1970), dada como:

$$f = (0.79 \ln Re - 1.64)^{-2} \quad 3000 < Re < 5 \times 10^6$$

El número de Nusselt en el flujo turbulento está relacionado con el factor de fricción a través de la analogía de Chilton-Colburn, expresada como

$$Nu = 0.125 f * Re * Pr^{\frac{1}{3}}$$

Una vez que se encuentra el factor de fricción, se puede usar esta ecuación de manera conveniente con el fin de evaluar el número de Nusselt tanto para los tubos lisos como para los ásperos; después de tener este valor el coeficiente de transferencia de calor por convección se determina a partir de<sup>22</sup>:

$$h = \frac{kNu}{D} \left[ \frac{w}{m^2 * C} \right]$$

## 7.2. CONVECCION EXTERNA FORZADA.

Los campos de flujo y las configuraciones geométricas para la mayor parte de los problemas de flujo externo son demasiado complicadas para ser resueltas analíticamente y , por lo tanto se tiene que confinar en las correlaciones basadas en datos experimentales. Por lo cual las correlaciones para el flujo a través de bancos de tubos están dadas a continuación.

**7.2.1 Flujo a través de bancos de tubos.** En la práctica es común encontrar flujo cruzado sobre bancos de tubos en equipos de transferencia de calor, como los condensadores y evaporadores de las plantas generadoras de energía eléctrica, los refrigeradores y aires acondicionados. En ese equipo, un fluido se mueve por dentro de los tubos, mientras que el otro se mueve sobre estos en una dirección perpendicular.

---

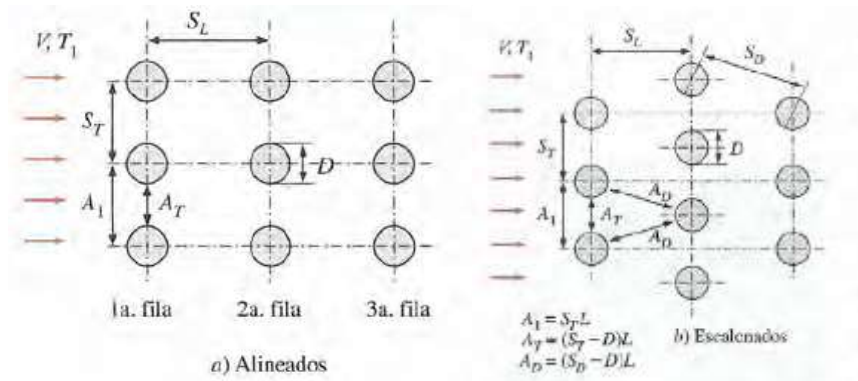
<sup>22</sup> CENGEL. Yunus . Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. (452-482) p.

Los tubos en un banco suelen disponerse alineados o escalonados en la dirección del flujo, como se muestra en la figura 20. El diámetro exterior del tubo  $D$  se toma la longitud característica. La disposición de los tubos en el banco se caracteriza por el paso transversal  $S_T$ , y el paso longitudinal  $S_L$  y el paso diagonal  $S_D$  entre los centros de tubos. El paso diagonal se determina a partir de

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2}$$

Conforme el fluido entra en el banco, el área de flujo disminuye  $A_l = S_L * L$  hasta  $A_T = (S_T - D)L$  entre los tubos y, como consecuencia, la velocidad del flujo aumenta.

Figura 20. Disposición de los tubos en los bancos alineados o escalonados



Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 418 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

En la disposición escalonada la velocidad puede aumentar más en la región diagonal si las filas de los tubos están muy aproximadas entre sí. En los bancos de tubos las características del flujo son denominadas por la velocidad máxima  $V_{max}$  que se tiene dentro del banco más que por la velocidad aproximada  $V$ . Por lo tanto, el número de Reynolds se define sobre la base de la velocidad máxima como

$$R_E = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} = \frac{V_{max} D}{\nu}$$

La velocidad máxima se determina con base en el requisito de conservación de la masa para el flujo compresible estacionario. Para la disposición de alineados la conservación máxima se tiene en el área mínima de flujo entre los tubos y la conservación de la masa se puede expresar como.

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V$$

En la disposición escalonada el fluido que se aproxima a través del área  $A_l$  pasa por el área  $A_T$  y, después por el área  $2A_D$ , conforme se desarrolla alrededor del tubo de la fila siguiente. Si  $2A_D > A_T$ , todavía la velocidad máxima ocurre en  $A_T$  entre los tubos por consiguiente, la relación  $V_{max}$  se puede hallar con la anterior ecuación para tubos escalonados. Pero si  $2A_D < A_T$  se tendrá que la velocidad máxima es

Escalonada y  $S_D < \left(\frac{S_T + D}{2}\right)$  si cumple esto  $V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V$

El flujo a través de tubos se estudia de manera experimental ya que es demasiado complejo para tratarse de forma analítica. Principalmente, se tiene interés en el coeficiente de transferencia de calor promedio para todo el banco de tubos, el cual depende del número de filas a lo largo del flujo así como la disposición y el tamaño de los tubos.

Se han puesto varias correlaciones, todas basadas en datos experimentales para el número de Nusselt promedio para el flujo cruzado sobre los bancos de los tubos. Más recientemente, Zukauskas ha propuesto correlaciones cuya forma general es

$$Nu_d = \frac{hD}{k} = CR_e^m Pr^n \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$$

Donde los valores de C,m,n dependen del valor del número de Reynolds. En la tabla 8 se dan esas correlaciones explícitamente para  $0.7 < Pr < 500$  y  $0 < Re < 2 \times 10^6$  y todas las propiedades, excepto  $Pr_s$  se deben evaluar a la temperatura media aritmética del fluido determinada a partir de  $Pr_s$  se halla a la temperatura  $T_s$ <sup>23</sup>

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2}$$

Dónde:

$T_e$  = Temperatura de entrada del fluido banco de tubos

$T_s$  = Temperatura de salida del fluido banco de tubos

Tabla 8. Correlaciones para el numero de Nusselt para el flujo cruzado sobre bancos de tubos para  $N > 16$

Disposición	Rango de Re	correlaciones
alineados	0-100	$Nu_d = 0.9R_e^{0.4} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$
	100-1000	$Nu_d = 0.52R_e^{0.5} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$
	1000- $2 \times 10^5$	$Nu_d = 0.27R_e^{0.63} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$
	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	$Nu_d = 0.033R_e^{0.8} Pr^{0.4} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$
escalonados	0-500	$Nu_d = 1.04R_e^{0.4} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$
	500-1000	$Nu_d = 0.71R_e^{0.5} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_s} \right)^{0.25}$

<sup>23</sup> CENGEL. Yunus, Op.cit,p.(396-423).

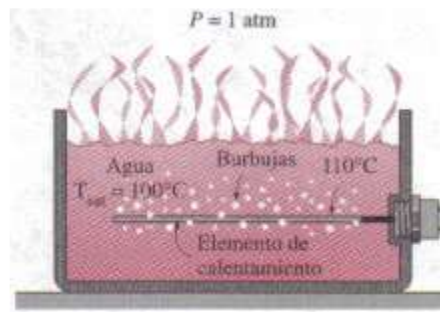
	$1000 - 2 \times 10^5$	$Nu_d = 0.35 \left(\frac{s_T}{s_l}\right)^{0.2} Re^{0.6} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$
	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	$Nu_d = 0.031 \left(\frac{s_T}{s_l}\right)^{0.2} Re^{0.8} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s}\right)^{0.25}$

Fuente: Tomada transferencia de calor de Cengel tabla 7-2 3 edición página 419

### 7.3. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EBULLICIÓN.

La ebullición es un proceso de cambio de fase de líquido a vapor precisamente como la evaporación, pero existen diferencias significativas entre las dos. La evaporación ocurren en la interface vapor- líquido cuando a presión del vapor es menor que la de saturación del líquido a una temperatura dada siendo que la evaporación no comprende formación de burbujas o movimiento de estas, en cambio la ebullición se entiende como la interfase solido-líquido cuando el líquido se pone en contacto con otra superficie mantenida a una temperatura  $T_s$ , suficiente por arriba de le temperatura de saturación  $T_{sat}$  de ese líquido como se observa en la figura 21.

Figura 21. Ebullición



Fuente: Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 562 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

El proceso de ebullición se caracteriza por la rápida formación de burbujas de vapor en la interfase sólido –líquido que se separan de la superficie cuando alcanzan cierto tamaño y presenta la tendencia a elevarse hacia la superficie libre del líquido. La ebullición es un fenómeno complicado debido al gran número de variables que intervienen en el proceso y los patrones complejos del movimiento del fluido causados por la formación y el crecimiento de las burbujas.

El flujo de calor en la ebullición, de una superficie sólida hacia el fluido, se expresa como base en la ley de Newton de enfriamiento como:

$$\dot{q}_{\text{ebullición}} = h(T_s - T_{\text{sat}}) = h\Delta T_{\text{exceso}} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

En donde  $\Delta T_{\text{exceso}} = T_s - T_{\text{sat}}$ , esta representa el exceso de la temperatura superficial por encima de la de saturación del fluido.

Para el análisis de transferencia de calor en la ebullición se deben tener en cuenta las propiedades del fluido como  $\rho, \mu, k$  y  $C_p$  y propiedades del vapor como  $h_{fg}$  la cual representa la energía absorbida conforme la unidad de masa del líquido se evapora a una temperatura o presión especificadas y es la cantidad primaria de energía transferida durante la transferencia de calor en la ebullición.

Las burbujas que se forman son debido a la tensión superficial  $\sigma$  en la interfase líquido-vapor producida por la fuerza de atracción sobre las moléculas que se encuentran en dicha interfase líquida. La tensión superficial disminuye al aumentar la temperatura y hace cero a la temperatura crítica. Esto explica porque por qué no se forman burbujas durante la ebullición a presiones y temperaturas supercríticas. La tensión superficial tiene la unidad de  $\left[ \frac{N}{m} \right]$ .

En la práctica el proceso de ebullición no ocurren en equilibrio y normalmente las burbujas no se encuentran en equilibrio termodinámico con el líquido que circula. Es decir, la temperatura y la presión del vapor en una burbuja suelen ser diferentes a las del líquido. La diferencia de presión entre el líquido y el vapor es equilibrada por la tensión superficial en la interfase. La diferencia de la

temperatura entre el vapor en una burbuja y el líquido circundante es la fuerza impulsora para la transferencia de calor entre las dos fases. Cuando el líquido está a una temperatura más baja que la de la burbuja, se transferirá calor de esta hacia aquel, lo que provoca que algo del vapor del interior de la burbuja se condense y esta llegue finalmente a aplastarse. Cuando el líquido está a una temperatura más alta que la burbuja, el líquido se transferirá de aquél hacia ésta, haciendo que la burbuja crezca y suba hasta la parte superior bajo la influencia de la flotación.

La ebullición se clasifica como ebullición en estanque o ebullición en flujo, dependiendo de la presencia de movimiento masivo del flujo. Se dice que la ebullición es en estanque cuando no se tiene flujo masivo del fluido, y que es en flujo (o ebullición en convección forzada) en presencia de ese flujo. En la ebullición en estanque el fluido se encuentra estacionado y cualquier movimiento de él se debe a corrientes de convección natural y al movimiento de las burbujas bajo la influencia de la flotación. La ebullición del agua en una cacerola colocada sobre una estufa es un ejemplo de ebullición de estanque. También se puede lograr este tipo de ebullición al colocar un serpentín de calentamiento en su seno. En la ebullición en flujo el fluido se fuerza a moverse por un tubo caliente a sobre una superficie por medios externos, como una bomba. Por lo tanto, la ebullición en flujo siempre viene acompañada por otros efectos de convección.

Las ebulliciones en estanque y flujo se clasifican todavía más como ebullición subenfriada o ebullición saturada, dependiendo de la temperatura de la masa de líquido. Se dice que la ebullición es subenfriada cuando la temperatura de la masa principal del líquido está por debajo de la de saturación  $T_{sat}$  (es decir, la masa principal del líquido está subenfriada) y es saturada cuando la temperatura del líquido es igual a la  $T_{sat}$  (es decir la masa del líquido es saturada). En las primeras etapas de la ebullición las burbujas se encuentran confinadas en una angosta región cercana a la superficie caliente. Esto se debe a que el líquido adyacente a la superficie caliente se vaporiza como resultado de ser calentado arriba de su temperatura de saturación. Pero estas burbujas desaparecen pronto al alejarse de la superficie caliente, como resultado de la transferencia de calor hacia ellas hacia

el líquido más frío que los rodea. Esto sucede cuando la masa de líquido está a una temperatura más baja que la de saturación. Las burbujas sirven como movedores de energía, de la superficie caliente hacia la masa del líquido, absorbiendo calor de aquella y liberándolo en esta medida que se condensan y aplastan. En este caso la ebullición queda confinada en una región en la localidad de la superficie caliente y, de manera apropiada, se llama ebullición local o subenfriada. Cuando toda la masa de líquido alcanza la temperatura de saturación, las burbujas empiezan a subir hasta la parte superior. Se puede ver burbujas en toda la masa del líquido y, en este caso, a la ebullición se le da el nombre de ebullición masiva o saturada. A continuación se considera con detalle lo diferentes regímenes de ebullición.

**7.3.1 Ebullición en estanque.** En la ebullición en estanque no se fuerza el fluido a que se mueva por medio de un impulsor como una bomba y cualquier movimiento en él se debe a corrientes de convección natural y al movimiento de burbujas por influencia de la flotación.

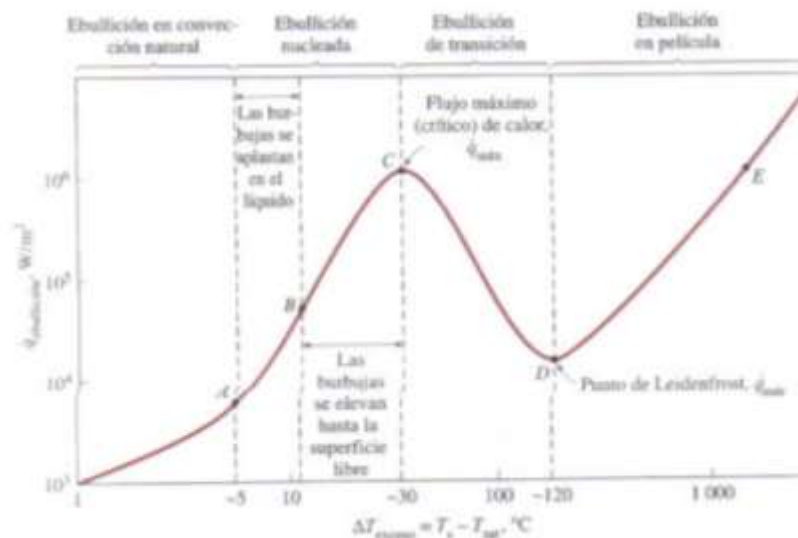
**7.3.1.1 Regímenes de ebullición y la curva de ebullición en estanque.** La ebullición es la forma más conocida de transferencia de calor, sin embargo la forma menos comprendida. Después de cientos de informes escritos sobre el tema todavía no se comprende por completo el proceso de formación de burbujas y aún se debe apoyar en relaciones empíricas o semiempíricas para predecir la velocidad de la transferencia de calor en la ebullición.

Gracias a los experimentos en 1934 por S. Nukiyama, donde calentaba alambres de nicromo y de platino calentados eléctricamente sumergidos sobre líquido, observo que la ebullición toma formas diferentes, dependiendo del valor de la temperatura en exceso,  $\Delta T_{exceso}$  se observaron 4 regímenes diferentes de ebullición.

- Ebullición en convección natural
- Ebullición nucleada
- Ebullición en transición
- Ebullición en película

En la figura 22 podemos observar la gráfica calor de la ebullición contra temperatura en exceso con los diferentes regímenes. Aunque esta grafica está dada para agua su forma general es la misma para los diferentes fluidos

Figura 22. Curva de ebullición para el agua a 1 atm



Fuente: Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 565 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

A continuación se explicara más detalladamente cada régimen

- **Ebullición en convección natural.**

Está representada en la figura 22 desde cero hasta el punto A. en este caso el líquido está ligeramente sobrecalentado y se evapora cuando sube a su superficie

libre. En este modo de ebullición la convección natural rige en movimiento del fluido y la transferencia de calor de la superficie de calentamiento al fluido se realiza por ese mecanismo.

- **Ebullición nucleada.**

Esta ebullición está representada en la figura 22 entre los puntos A y C en donde las primeras burbujas comienzan a formarse en el punto A, estas se forman con rapidez cada vez mayor, en un número creciente de sitios de nucleación, conforme nos movemos a lo largo de la curva hacia el punto C.

Este régimen se puede separar en dos regiones distintas. La región A-B en donde se forman las burbujas aisladas en varios sitios preferenciales de la nucleación sobre la superficie calentada. Pero estas se disipan en el líquido poco después de separarse de la superficie. En la segunda región B-C la temperatura del calentador se incrementa todavía más y las burbujas se forman a velocidades tan grandes en número tan grande en sitios de nucleación que forman numerosas columnas continuas de vapor en el líquido. Las burbujas se mueven a todo lo largo del camino hasta la superficie libre, en donde se revientan y libera su contenido de vapor.

- **Ebullición de transición.**

Esta entre los puntos C y D de la gráfica 22, en donde a medida que se incrementa la temperatura del calentador y, por consiguiente, la  $\Delta T_{exceso}$  más allá del punto C, el flujo de calor disminuye. Esto se debe que una fracción grande de la superficie del calentador se cubre con una película de vapor, la cual actúa como un aislamiento debido a su baja conductividad térmica en relación con la del líquido.

- **Ebullición de película.**

En la figura 22 se observa más allá del punto D. en esta región la superficie de calentamiento queda cubierta por completa por una película continua estable de vapor. El punto D en donde el flujo de calor alcanza un mínimo, se llama punto de

leidenfrost, en honor de J.c. Leidentfrost, quien en 1756 observo que las gotas de líquido sobre una superficie del calentador y el líquido eran las responsables de las bajas velocidades de transferencia de calor en la región de ebullición en película. La velocidad de transferencia de calor aumenta al incrementar la temperatura en exceso como resultado de la transferencia de calor de la superficie calentada hacia el líquido, a través de la película de vapor, por radiación, la cual se vuelve significativa a altas temperaturas.

**7.3.2 Correlaciones de transferencia de calor para ebullición nucleada.** En este régimen la velocidad de transferencia de calor depende de la naturaleza de la nucleación (el número de sitios activos de nucleación sobre la superficie, la rapidez de la formación de burbujas en cada sitio, etc.). Lo cual es difícil de predecir. El tipo y la condición de la superficie calentada también afectan la transferencia de calor. Estas complicaciones dificultan el desarrollar relaciones teóricas para la transferencia de calor en régimen de ebullición nucleada y se necesitan apoyar en relaciones basadas en datos experimentales. La correlación que se usa con mayor amplitud para la velocidad de la transferencia de calor en régimen de ebullición nucleada fue propuesta en 1952 por Rohsenow y se expresa como:

$$\dot{q}_{nucleada} = \mu_l * h_{fg} * \left[ \frac{g * (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[ \frac{Cp_l * (T_{superficial} - T_{sat})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n} \right]^3$$

Todas las propiedades del fluido se calculan a la  $T_{sat}$  y en donde:

$\dot{q}_{nucleada}$  =Flujo de calor en la ebullición nucleada,  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$

$\mu_l$  = Viscosidad del líquido,  $\left[ \frac{Kg}{m*s} \right]$

$h_{fg}$  = Entalpia de vaporización,  $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

$g$  = Aceleracion gravitacional,  $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

$\rho_l$  = Densidad del líquido,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\rho_v$  = Densidad del vapor,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$Cp_l$  = Calor especifico del líquido,  $\left[\frac{J}{Kg * C}\right]$

$T_{superficial}$  = Temperatura superficial del calentador,  $[^{\circ}C]$

$T_{sat}$  = Temperatura de saturación del fluido,  $[^{\circ}C]$

$Pr_l$  = Numero de Prandtl del líquido

$\sigma$  = Tensión superficial de la interfase liquido-vapor,  $\left[\frac{N}{m}\right]$

$C_{sf}$  = Constante experimental dependiente de la combinación superficie- líquido.

En donde los valores de la tensión superficial interfase líquido- vapor para el agua los podemos observar en la tabla 9 y para otros fluidos en la tabla 10. En la tabla 11 se encuentran los valores determinados de forma experimental de la constante  $C_{sf}$  para varias combinaciones de fluidos-superficie. Estos valores se pueden usar para cualquier configuración geométrica, ya que se encuentra que durante la ebullición nucleada la velocidad de la transferencia de calor es independiente de la configuración geométrica y de la orientación de la superficie calentada<sup>24</sup>.

---

<sup>24</sup> CENGEL. Yunus, Op.cit, p. (562-578).

Tabla 9. Tensión superficial de la interfase liquido-vapor para el agua

$T, [C]$	$\sigma, \frac{N}{m}$
0	0,0757
20	0,0727
40	0,0696
60	0,0662
80	0,0627
100	0,0589
120	0,055
140	0,0509
160	0,0466
180	0,0422
200	0,0377
220	0,0331
240	0,0284
260	0,0237
280	0,019
300	0,0144
320	0,0099
340	0,0056
360	0,0019
374	0

Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 568 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

Tabla 10. Valores del coeficiente  $C_{sf}$  y de  $n$  para varias combinaciones fluido-superficie

<b>Combinación fluido-superficie de calentamiento</b>	<b><math>C_{sf}</math></b>	<b><math>n</math></b>
<b>Agua-cobre (pulido)</b>	0,013	1
<b>Agua-cobre (rayado)</b>	0,0068	1
<b>Agua-acero inoxidable(pulido mecánicamente)</b>	0,013	1
<b>Agua-acero inoxidable(rectificado y pulido)</b>	0,006	1
<b>Agua-acero inoxidable(recubierto de teflón picado)</b>	0,0058	1
<b>Agua-acero inoxidable(corroído químicamente)</b>	0,013	1
<b>Agua- latón</b>	0,006	1
<b>Agua-níquel</b>	0,006	1
<b>Agua-platino</b>	0,013	1
<b>n-pentano-cobre(pulido)</b>	0,0154	1,7
<b>n-pentano-cromo</b>	0,015	1,7
<b>Benceno-cromo</b>	0,101	1,7
<b>Alcohol etílico-cromo</b>	0,0027	1,7
<b>Tetracloruro de carbono-cobre</b>	0,013	1,7
<b>Isopropanol-cobre</b>	0,0025	1,7

Fuente:CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 570 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

Tabla 11. Tensión superficial de algunos fluidos

Fluido	Rango de temperaturas en °C	Tensión superficial $\sigma, \frac{N}{m}$
Amoniaco	-75 a -40	0,0264+0,000223T
Benceno	10 a 80	0,0315-0,000129T
Butano	-70 a -20	0,0149-0,000121T
Bióxido de carbono	-30 a -20	0,0043-0,000160T
Alcohol etílico	10 a 70	0,0241-0,000083
Mercurio	5 a 200	0,4906-0,000205T
Alcohol metílico	10 a 60	0,0240-0,000077T
Pentano	10 a 30	0,0183-0,000110T
Propano	-90 a -10	0,0092-0,000087T

Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 569 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

#### 7.4. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDENSACIÓN.

La condensación se presenta cuando la temperatura del vapor se reduce por debajo a la temperatura de saturación  $T_{sat}$ . este proceso se lleva a cabo cuando el vapor entra en contacto con una superficie solida cuya temperatura superficial  $T_s$  este por debajo de la temperatura de saturación  $T_{sat}$  de ese vapor. Pero la condensación también puede ocurrir sobre la superficie libre de un líquido o incluso en un gas, cuando la temperatura de estos a la cual se expone el vapor está por debajo de la  $T_{sat}$ .

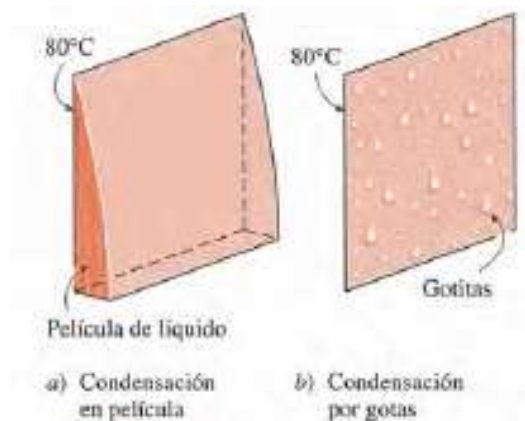
Se observan forman distintas de condensación: en película y por gotas. En la condensación por película el condensado moja la superficie y forma una película de líquido sobre la superficie, la cual resbala hacia abajo debido a la influencia de la gravedad. El espesor de la película aumenta en la dirección del flujo a medida que más vapor se condensa sobre ella. Esta es la forma en la que por lo general ocurre la condensación en la práctica. En la condensación por gotas el vapor condensado forma gólicas sobre la superficie, en lugar de una película continua, y

esa superficie se cubre de un número incontable de gólicas de diámetros variables.

En la figura 23 parte (a) podemos observar la condensación por película en la cual la superficie se cubre por una película de líquido de espesor creciente y esta pared “pared líquida” entre la superficie sólida el vapor sirve como resistencia a la transferencia de calor. El calor de vaporización  $h_{fg}$  liberado a medida que el vapor se condensa, debe pasar a través de la resistencia antes de que pueda llegar a la superficie sólida y ser transferido al medio que está al otro lado. Sin embargo, en la condensación por gotas figura 23 parte (b) estas resbalan hacia abajo cuando llegan a tener cierto tamaño, despejando la superficie y exponiéndola al vapor.

En este caso no se tiene película de líquido que oponga resistencia a la transferencia de calor. Como resultado la condensación por gotas se puede lograr transferencia de calor 10 veces mayor que la asociada con la condensación por película pero no es de larga duración así que la condensación de película en la práctica es la más común.

Figura 23. Condensación de película y gotas



Fuente: Fuente: CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. 578 p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

**7.4.1 Condensación en película.** La transferencia de calor en la condensación depende de si el flujo del condensado es laminar o turbulento. Una vez el número de Reynolds proporciona el criterio para el régimen de flujo el cual se define como

$$Re = \frac{4\dot{m}}{p\mu_l}$$

Dónde:

$\dot{m}$ =gasto de masa de condensado en la parte más baja,  $\left[\frac{Kw}{s}\right]$

$p$ = perímetro mojado del condensado,  $[m]$

$\mu_l$ =viscosidad del líquido,  $\left[\frac{kg}{s}\right]$

El calor latente de vaporización  $h_{fg}$  es liberado cuando se condensa una unidad de masa de vapor y normalmente representa la transferencia de calor por unidad de masa condensada. Sin embargo, en un proceso real el condensado se enfría todavía más hasta alguna temperatura promedio entre  $T_{sat}$  y  $T_s$  liberando más calor. Por lo tanto, la transferencia real de calor será mayor.

En 1956 Rohsenow demostró que se puede tomar en cuenta el enfriamiento del líquido al reemplazar  $h_{fg}$  por el calor latente de vaporización modificado  $h_{fg}^*$  definido como:

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68 C_{pl}(T_{sat} - T_s)$$

Dónde:

$C_{pl}$  = es el calor específico del líquido a la temperatura promedio de película,  $\left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}\right]$

$T_{sat}$ = temperatura de saturación del líquido,  $[^\circ C]$

$T_s$ = temperatura superficial,  $[^\circ C]$

$h_{fg}$ = calor latente de vaporización,  $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

Con estas consideraciones, la razón de la transferencia de calor se puede expresar como:

$$\dot{Q}_{conden} = hA_s(T_{sat} - T_s) = \dot{m}h_{fg} *$$

Dónde:

$A_s$ = área de transferencia de calor (sobre la cual ocurre la condensación),  $[m^2]$

$\dot{m}$ = gasto de masa de condensado en la parte más baja,  $[\frac{Kg}{s}]$

$h_{fg} *$ = calor latente de vaporización modificado,  $[\frac{J}{Kg}]$

**7.4.2 Correlaciones de la transferencia de calor para la condensación en película en tubos verticales.** Para calcular el coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación en película laminar sobre las superficies exteriores del tubo verticales, siempre que el diámetro del tubo sea más grande en relación con el espesor de la película del líquido se utilizan las ecuaciones para las placas verticales si se expresa como<sup>25</sup>:

$$h_{condensacion} = 0,943 * \left[ \frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg} ** k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_{superficial}) * L_{tubo}} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Dónde:

Todas las propiedades del líquido se evalúan temperatura de película

$T_{film} = \frac{T_{superficial} + T_{sat}}{2}$ . El  $h_{fg}$  y  $\rho_v$  se deben evaluar a la temperatura de saturación

$T_{sat}$

$g$  = aceleración gravitacional,  $[\frac{m}{s^2}]$

$\mu_l$  = Viscosidad del líquido,  $[\frac{Kg}{m*s}]$

<sup>25</sup> CENGEL. Yunus, Op.cit,p.(579-592).

$\rho_l$  = Densidad del líquido,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$\rho_v$  = densidad del vapor,  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

$h_{fg}$  \* = calor latente de vaporización modificado  $\left[\frac{J}{Kg}\right]$

$k_l$  = conductividad térmica del líquido,  $\left[\frac{w}{m \cdot C}\right]$

$L_{tubo}$  = altura del tubo,  $[m]$

$T_{superficial}$  = temperatura superficial del tubo  $[^{\circ}C]$

$T_{sat}$  = temperatura de saturación del fluido condensándose  $[^{\circ}C]$

Esta ecuación para placas verticales se pueden utilizar para calcular el coeficiente de transferencia de calor promedio para la condensación laminar sobre las superficies exteriores de tubos horizontales, siempre que el diámetro del tubo sea tan grande en relación con el espesor de la película del líquido

## **8. SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES**

En este capítulo se muestra el paso a paso del diseño térmico del prototipo de evaporación al vacío para el tratamiento de aguas residuales industriales. Con la ayuda de software EES se realizó un modelamiento térmico con el fin de encontrar el dimensionamiento del prototipo, además se describen la selección de cada uno de los componentes para el equipo.

### **8.1. DISEÑO TÉRMICO DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR.**

Para poder tener una idea de las dimensiones del evaporador y el condensador, se llevó a cabo el diseño térmico de cada uno de ellos. Estos diseños se apoyaron en diferentes bases teóricas de transferencia de calor y termodinámica; de las cuales se extrajeron las respectivas ecuaciones para plasmar un código sobre el comportamiento de los equipos en el software EES, este a su vez permitió obtener el dimensionamiento requerido para la construcción de los prototipos.

Antes de desarrollar el código se adecuó un sistema para tener una idea de los valores reales de los parámetros de funcionamiento de un equipo de evaporación al vacío. En la figura 24 se puede visualizar una fotografía de este montaje.

Figura 24. Sistema de evaporación al vacío para experimentación



**8.1.1 Diseño térmico del condensador.** Para realizar el diseño térmico del condensador se tuvieron en cuenta algunas consideraciones iniciales, que fueron la base para el proceso de cálculo con el fin obtener su dimensionamiento.

**8.1.1.1 Consideraciones iniciales.** A continuación se muestran las consideraciones que se tuvieron en cuenta para el diseño térmico del condensador.

- **Consideraciones sistema de condensación**

$T_{en} = 27 [^{\circ}\text{C}]$ , Temperatura agua disponible.

Se desea que el agua de enfriamiento tenga una diferencia de temperatura de  $3.5^{\circ}\text{C}$  por lo tanto la temperatura de salida del agua de enfriamiento en el condensador será:

$T_{sal} = 30.5 [^{\circ}\text{C}]$

$\dot{M}_w = 0,09 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ , este es el valor final encontrado en la realización del código donde las dimensiones del sistema eran proporcionales hablando en términos de la geometría, además de que al realizar el cálculo del calor a retirar del condensador teniendo en cuenta este flujo másico de agua, la diferencia de temperatura y el calor específico; al igualar este calor con el calor de vaporización del agua, arrojará un valor de presión de vacío que se pudiese generar con las bombas de vacío existentes en el mercado teniendo en cuenta el flujo másico de condensado que se deseaba.

- **Consideraciones de vapor**

$\dot{M}_{vap} = 2 \left[ \frac{kg}{h} \right]$ , requerimiento para condensar la rata de vapor proveniente del evaporador.

- **Consideraciones geométricas de los tubos**

Se decidió tomar las siguientes consideraciones geométricas, de acuerdo con estandarización de tubos de cobre ver Anexo B y teniendo en cuenta la proporción del condensador en cuanto a altura y diámetro.

$$D_{ext} = \frac{5}{8} [in] = 15.88 [mm],$$

$$Espesor = 0.89 [mm]$$

$$D_{int} = 14.1 [mm]$$

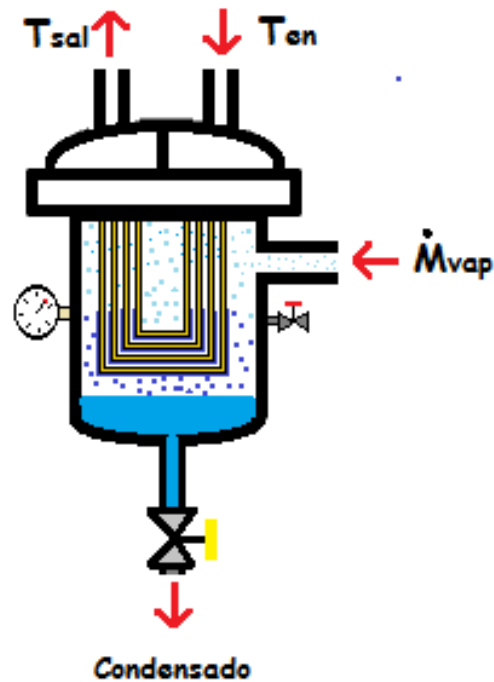
$$N_{tubos} = 17$$

- **Consideración del lugar**

$P_{atm} = 91000 [Pa]$ , presión barométrica en Bucaramanga, Santander, Colombia.

Para tener mayor facilidad de la comprensión del funcionamiento y la ubicación de los parámetros más importantes en figura 25 se muestra un esquema del condensador.

Figura 25. Esquema condensador



**8.1.1.2 Procedimiento de cálculo.** En la Tabla 12 se observa paso a paso el procedimiento de cálculo que se llevó a cabo para el condensador utilizando como ayuda el software EES, para observar detalladamente el código para el cálculo de este equipo remítase al ANEXO B.

Tabla 12. Procedimiento de cálculo del condensador

Fórmulas utilizadas	Comentarios	Resultados
<p>Cálculo de <math>Q_{condensacion}</math> del agua utilizada para la condensación del vapor</p>		
$Q_{agua} = \dot{M}_w * C_{p_w}(T_{en} - T_{sal})$	$\dot{M}_w = 0,09 \left[ \frac{kg}{s} \right]$ <p><math>C_{p_w}</math> Calculado a <math>T_{prom}</math> y <math>P_{atm}=91000</math></p> $T_{prom} = \frac{T_{en} + T_{sal}}{2}$ $T_{prom} = 28.76 [^{\circ}C]$ $C_{p_w} = 4183 \left[ \frac{J}{Kg * C} \right]$ $T_{en} = 27 [^{\circ}C]$ $T_{sal} = 30.5 [^{\circ}C]$	$Q_{agua} = 1327 [w]$
<p>Cálculo <math>h_{fg}</math> por el cambio de fase</p>		
$Q_{agua} = Q_{condensación}$ $Q_{condensación} = \dot{M}_{vap} * h_{fg}$	$\dot{M}_{vap} = 2 \left[ \frac{kg}{h} \right]$	$h_{fg} = 2.389 * 10^6 \left[ \frac{J}{Kg} \right]$
<p>De aquí en adelante comienza un proceso iterativo para el cálculo de la <math>P_{vacío}</math></p>		

<p>Cálculo de la <math>P_{vacío}</math> con el <math>h_{fg}</math></p>	<p>Se asume un valor de presión de vacío y se calcula <math>h_{fg\text{calculada}}</math> este valor tiene que ser igual al <math>h_{fg}</math></p>	
<p><math>h_f = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P = P_{vacío}; X = 0)</math>  <math>h_g = \text{Enthalpy}(\text{Water}; P = P_{vacío}; X = 1)</math>  <math>h_{fg\text{calculada}} = h_g - h_f</math></p>	<p>Presión de vacío asumida  <math>P_{vacío} = 10700 \text{ [Pa]}</math></p>	<p><math>h_{fg\text{calculada}} = 2.389 * 10^6 \left[ \frac{J}{Kg} \right]</math>  <math>T_{sat} = 47.12 \text{ [C]}</math></p>
<p>Aquí termina el proceso iterativo para el cálculo de la presión de vacío en el interior del condensador esta presión se utilizara para los cálculos que se muestran a continuación. Ver ANEXO B para observar tabla de iteración 1</p>		
<p>Cálculos para (<math>h_{confor}</math>) por convección forzada externa.</p>		
<p><math>\dot{M}_{cada\ tubo} = \frac{\dot{M}_w}{N_{tubos}}</math></p>	<p><math>N_{tubos} = 18</math>  <math>D_{int} = 0.0141 \text{ [m]}</math>  <math>\dot{M}_w = 0,09 \left[ \frac{kg}{s} \right]</math></p>	<p><math>\dot{M}_{cada\ tubo} = 0,005 \left[ \frac{Kg}{s} \right]</math></p>

$V_{tubo} = \frac{\dot{M}_{cada\ tubo}}{\rho * A_{trans}}$	$\rho = 996 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ <p>Calculada a la</p> $T_{prom} = 28.76 [C]$ $P_{atm} = 91000 [Pa]$	$V_{tubo} = 0,032 \left[ \frac{m}{s} \right]$
$RE = \frac{V_{tubo} * D_{int} * \rho}{\mu}$	<p>Calculadas a la <math>T_{prom}</math> y la <math>P_{atm}</math></p> $\rho = 996 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ $\mu = 0,00081 \left[ \frac{Kg}{m * s} \right]$	$RE = 551.4$
$f = (0,79 * \ln(RE) - 1,64)^{-2}$	<p>Formula Tomada bases teóricas capítulo 5 convección externa forzada</p>	$f = 0,089$
$Nusselt = 0,125 * f * RE_1 * [Pr_1]^{\frac{1}{3}}$	<p>Formula Tomada bases teóricas capítulo 5 convección externa forzada</p> $Pr_1 = 5,702$ <p>Calculada a la <math>T_{prom}</math> y la <math>P_{atm}</math></p>	$Nusselt = 10,99$

$h_{confor} = \frac{Nusselt * K_1}{D_{int}}$	$K_1 = 0,601 \left[ \frac{W}{m * C} \right]$ Calculada a la $T_{prom}$ y la $P_{atm}$	$h_{confor} = 468.7 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$
Cálculo de la $L_{mtd}$		
$L_{mtd} = \frac{T_{en} - T_{sat} - (T_{sal} - T_{sat})}{\ln \left[ \frac{T_{en} - T_{sat}}{T_{sal} - T_{sat}} \right]}$	$T_{en} = 27 [C]$ $T_{sal} = 30,5 [C]$ $T_{sat} = 47.12 [C]$	$L_{mtd} = 18,3 [C]$
De aquí en adelante comienza un proceso iterativo. Ver ANEXO B para observar tabla de iteración 2		
Cálculo de la $L_{tubo}$ asumiendo un $U$		
$A_s = \frac{Q_{evaporacion}}{U_{asumido} * L_{mtd}}$ $A_s = \pi * D_{int} * L_{tubo} * N_{tubos}$	$U_{asumido} = 448.1 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$	$L_{tubo} = 0,203 [m]$ $A_s = 0.16 [m^2]$
Cálculo de la $T_{superficial}$ por $Q_{conveccion}$ forzada		
$Q_{condensación} = Q_{convección forzada}$ $Q_{convección} = h_{confor} * A_{ext} * (T_{superficial} - T_{prom})$	$A_{ext} = N_{tubos} * \pi * D_{int}$ $* L_{tubo}$ $* N_{tubos}$	$T_{superficial} = 46,26 [C]$

<p>Cálculo de <math>h_{condensación}</math></p>		
$h_{condensacion} = 0,943 * \left[ \frac{g * \rho_l * (\rho_l - \rho_v) * h_{fg} * k_l^3}{\mu_l * (T_{sat} - T_{superficial}) * L_{tubo}} \right]^{\frac{1}{4}}$	<p>Todas las propiedades del líquido calculadas a:</p> $T_{film} = \frac{T_{superficial} + T_{sat}}{2}$ <p><math>h_{fg}</math> y <math>\rho_v</math> se evaluó a <math>T_{sat}</math></p> $\mu_l = 0,0005789 \left[ \frac{Kg}{m * s} \right]$ $\rho_l = 989,4 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ $h_{fg} = 2,389 * 10^6 \left[ \frac{J}{Kg} \right]$ $\rho_v = 0,051 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$ $k_l = 0,63 \left[ \frac{w}{m * C} \right]$ $g = 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$	$h_{condensacion} = 14493 \left[ \frac{w}{m^2 * C} \right]$
<p>Cálculo del <math>U</math> por la Resistencias</p>	<p>Donde este <math>U</math> debe ser igual al que asumimos anteriormente</p>	

Ver formula B		$U = 448.1 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$
---------------	--	--

**Formula B**

$$U = \frac{1}{A_s * \left[ \frac{1}{h_{confor} * \pi * D_{int} * L_{tubo} * N_{tubos}} + \frac{\ln \left[ \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right]}{2 * \pi * K_{cobre} * N_{tubos} * L_{tubo}} + \frac{1}{h_{ebullicion} * \pi * D_{ext} * L_{tubo} * N_{tubos}} \right]}$$

**8.1.2 Diseño térmico del evaporador.** Para realizar el diseño térmico del evaporador se tienen en cuenta algunas consideraciones iniciales.

**8.1.2.1 Consideraciones iniciales.** A continuación se muestran las consideraciones que se tienen en cuenta para el desarrollo del diseño térmico del condensador.

- **Consideraciones del agua de calentamiento**

$T_{en} = 52 [^{\circ}\text{C}]$ , supuesta así para alcanzar la temperatura de saturación dentro del evaporador

$\dot{M}_w = 0,12 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$  este es el valor final encontrado en la realización del código donde las dimensiones del sistema eran proporcionales hablando en términos de geometría.

- **Consideraciones de vapor**

$\dot{M}_{vap} = 2 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{h}} \right] = 0,00055 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ , requerimiento de la rata de vaporización para obtener esta misma cantidad de condensado.

- **Consideraciones presión de vacío y temperatura de saturación**

$P_{vacio} = 10700 [\text{Pa}]$  absolutos calculados a partir de las disposiciones del agua fría del condensador y de la diferencia de temperatura que se quería en esta.

$T_{sat} = 47,12 [^{\circ}\text{C}]$ , calculada a la  $P_{vacio}$

- **Consideraciones geométricas**

Se decidió tomar las siguientes consideraciones geométricas, de acuerdo con estandarización de tubos en acero inoxidable ver ANEXO A, teniendo en cuenta la proporción del evaporador en cuanto a altura y diámetro.

$$D_{int} = 1 \text{ [in]} = 0,0254 \text{ [m]}$$

$$N_{tubos} = 17 ,$$

- **Consideración del lugar**

$P_{atm} = 91000 \text{ [Pa]}$ , barométrica en Bucaramanga, Santander, Colombia.

- **Consideraciones del equipo**

Evaporador tipo calandria

Disposición de los tubos: alineados

$$S_T = 3 \text{ [cm]} \text{ Distancia entre centros de tubos}$$

**8.1.2.2 Procedimiento de cálculo.** En la Tabla 13 se observa paso a paso el procedimiento de cálculo que se llevó a cabo para dimensionar el evaporador utilizando como ayuda en software EES, ver ANEXO C donde se muestra detalladamente el código para el cálculo del evaporador.

Para tener mayor facilidad de la comprensión del funcionamiento y la ubicación de los parámetros más importantes en figura 26 se muestra un esquema del evaporador.

Figura 26. Esquema evaporador

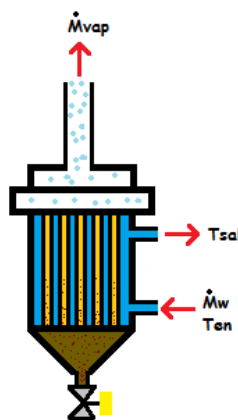


Tabla 13. Procedimiento de cálculo del evaporador.

<p>Cálculo del <math>Q_{evaporacion}</math> por el cambio de fase</p>		
$Q_{evaporacion} = \dot{M}_{vap} * h_{fg}$ $h_f = Enthalpy(Water; T = T_{sat}; X = 0)$ $h_g = Enthalpy(Water; T = T_{sat}; X = 1)$ $h_{fg} = h_g - h_f$	$h_{fg} = 2,389 * 10^6 \left[ \frac{J}{Kg} \right]$ <p>Calculada a <math>T_{sat}</math> La temperatura de saturación se calcula a la presión de vacío.</p>	$Q_{evaporacion} = 1327 [w]$
<p>Cálculo de la <math>T_{sal}</math> del agua utilizada para el suministro de calor y la respectiva evaporación del agua residual.</p>		
$Q_{evaporacion} = Q_{agua}$ $Q_{agua} = \dot{M}_w * Cp_w(T_{en} - T_{sal})$	$Cp_w = 4182 \left[ \frac{J}{Kg * C} \right]$ <p>Calculado a <math>T_{en}</math> y <math>P_{atm}</math></p> $\dot{M}_w = 0,12 \left[ \frac{Kg}{s} \right]$	$T_{sal} = 49,36 [C]$

Cálculo de la $L_{mtd}$		
$L_{mtd} = \frac{T_{en} - T_{sat} - (T_{sal} - T_{sat})}{\ln \left[ \frac{T_{en} - T_{sat}}{T_{sal} - T_{sat}} \right]}$	$T_{en} = 52[C]$ $T_{sal} = 49,36[C]$ $T_{sat} = 47,12[C]$	$L_{mtd} = 3,39 [C]$
De aquí en adelante comienza un proceso iterativo. remítase al ANEXO C para observar la tabla de iteración		
Cálculo del $A_s$ Se comienza el proceso asumiendo $U$		
$U * A_s = \frac{Q_{evaporacion}}{L_{mtd}}$	Asumiendo U, $U_{asumido} = 1390 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$	$A_s = 0,28[m^2]$
$A_s = N_{tubos} * \pi * D_{int} * L_{tubo}$	$N_{tubos} = 17,$ $D_{int} = 1 \text{ pulgada}$	$L_{tubo} = 0,23 [m]$

<p>Cálculos para <math>(h_{confor})</math> por convección externa forzada en un arreglo de tubos alineado</p>		
$\dot{M}_w = \rho * V_{el} * A_{trans}$	<p><math>A_{trans}</math> área longitudinal entre los espacios de los tubos</p> <p><math>S_T = 0,03m</math></p> <p><math>A_{trans} = 6 * S_T * L_{tubo}</math></p> <p><math>\rho = 987,7 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]</math></p> <p>Calculada a</p> <p><math>T_{1prom} = \frac{T_{en} - T_{sal}}{2} = 50.68</math></p> <p>Y</p> <p><math>P_{atm}</math></p>	$V_{el} = 0,0034 \left[ \frac{m}{s} \right]$
$V_{max} = \left[ \frac{S_T}{S_T - D_{ext}} \right] * V_{el}$	<p><math>S_T = 0,03m</math></p> <p>Formula tomada capítulo 5 bases teóricas convección externa forzada disposición alineada.</p>	$V_{max} = 1,25 \left[ \frac{m}{s} \right]$

$RE_1 = \frac{V_{max} * D_{ext} * \rho}{\mu}$	$\mu = 0,00054 \left[ \frac{Kg}{m * s} \right]$ <p>Calculada a  <math>T_{1prom}, P_{atm}</math></p> $D_{ext} = 0.0254m$	$RE_1 = 58218$
$Nusselt = 0,52 * (RE_1^{0,5}) * (Pr_1^{0,36}) * \left[ \frac{Pr_1}{Pr_s} \right]^{0,25}$	<p>Formula tomada capítulo 5 bases teóricas tabla 7.</p> $Pr_1 = 3,837$ <p>Calculado a  <math>T_{1prom}, P_{atm}</math></p> $Pr_s = 3,672$ <p>Calculado a <math>T_{sal}</math> y <math>P_{atm}</math></p>	$Nusselt = 426,8$
$h_{confor} = \frac{Nusselt * K_w}{D_{ext}}$	$K_w = 0,6124 \left[ \frac{W}{m * C} \right]$ <p>Calculado a  <math>T_{1prom}, P_{atm}</math></p>	$h_{confor} = 10607 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$
<p>Cálculo de la <math>T_{supeficial}</math> por ebullición en estanque</p>		

$$Q_{EBULLICION} = Q_{evaporacion}$$

$$Q_{EBULLICION} = \left[ \mu_l * h_{fg} * \left[ \frac{g * (\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} * \left[ \frac{Cp_l * (T_{superficial} - T_{sat})}{C_{sf} * h_{fg} * Pr_l^n} \right]^3 \right] * A_{evaporador}$$

Todas las propiedades del líquido y del vapor fueron calculadas a la  $T_{sat}$  y la  $P_{vacio}$

$$\mu_l = 0,00057 \left[ \frac{Kg}{m * s} \right]$$

$$\rho_l = 989,3 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$Cp_l = 4182 \left[ \frac{J}{Kg * C} \right]$$

$$Pr_l = 3,83$$

$$h_{fg} = 2,389 * 10^6 \left[ \frac{J}{Kg} \right]$$

$$\rho_v = 0,0512 \left[ \frac{Kg}{m^3} \right]$$

$$g = 9,81 \left[ \frac{m}{s^2} \right]$$

$$\sigma = 0,0662$$

tomado tabla 8

$$C_{sf} = 0,0058$$

$$n = 1$$

tomado tabla 10

$$T_{superficial} = 49,7 [C]$$

Cálculo del $(h_{ebullicion})$ por ebullición en estanque		
$h_{ebullicion} = \frac{Q_{EBULLICION}}{(T_{superficial} - T_{sat})}$		$h_{ebullicion} = 1786 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$
Cálculo del $U$ por la Resistencias	Donde ese $u$ tiene que ser igual con el $U_{asumido}$	
Formula A	$K_{inox} = 16 \left[ \frac{W}{m * C} \right]$	$U = 1390 \left[ \frac{W}{m^2 * C} \right]$

### Fórmula A

$$U * A_s = \frac{L_{tubo}}{\left[ \frac{1}{h_{confor} * \pi * D_{int}} + \frac{\ln \left[ \frac{D_{ext}}{D_{int}} \right]}{2 * \pi * K_{inox}} + \frac{1}{h_{ebullicion} * \pi * D_{ext}} \right]}$$

## 8.2. COMPONENTES.

Antes de la ejecución de algún diseño, se seleccionaron cada uno de los componentes de que constaría el sistema ya que se podía disponer de diferentes formas geométricas. A continuación se nombran uno a uno los componentes seleccionados. Remítase al ANEXO E Para observar las dimensiones de los componentes más importantes.

**8.2.1 Condensador.** El condensador es un intercambiador de calor con tubos de cobre en “U” como se muestra en la figura 27. Sus demás componentes están contruidos de acero inoxidable para evitar que se corroa y contamine el condensado. El espesor de brida es de 3/16” y el espesor del casco es de 1/8”, su selección fue enfocada a razones de construcción y estandarización, debido a que el recipiente no está sometido a altas cargas por presión. Remítase ANEXO A para ver el catálogo de láminas de acero inoxidable. En la figura 28 se muestra un dibujo en perspectiva del condensador y en la tabla 14 se observan los parámetros físicos del mismo.

Figura 27. Tubos en U de intercambiador para la condensación



Figura 28. Condensador 3D



Tabla 14. Parámetros físicos del condensador

Parámetros	Valores	Para conocer el cálculo de los valores remítase a la página.
Material	Acero inoxidable	106
Número de tubos	18	90
Diámetro de los tubos [in]	5/8	90
Área de transferencia de calor [m <sup>2</sup> ]	0,16	96
Longitud de los tubos [m]	0,25 0,3 0,35*	96
Coefficiente global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot C}\right]$	448	97

\* En los cálculos realizados con el programa EES se obtuvo que longitud del tubo fue de 20 cm. En la tabla 14 se muestran tres valores, debido que por razones de construcción para realizar el dobles en "U" y generar la soldadura con la brida se hizo necesario aumentar la longitud. Además por la distribución geométrica de los tubos exteriores, debían ser más largos que los interiores ver figura 27. esto se realizó teniendo en cuenta que se iba aumentar la capacidad de retirar calor del condensador.

**8.2.2 Evaporador.** El evaporador del sistema, es de tipo calandria y material acero inoxidable debido a que los productos que se tratan son altamente corrosivos, este se muestra en la figura 29. El espesor de brida es de 3/16" y el espesor del casco es de 1/8", su selección fue enfocada a razones de construcción y estandarización, debido a que el recipiente no está sometido a altas cargas por presión. Remítase ANEXO A para ver el catálogo de láminas de acero inoxidable.

Es un equipo de fácil mantenimiento pues consta de un sistema desmontable tipo brida que le permite su desensamble, en la unión de esta cuenta con un empaque que permite el sello hermético como se muestra en la figura 30. Para más detalles del empaque remítase ANEXO A. En la figura 30 Se observan las bridas del equipo, además en la tabla 15 podemos observar los parámetros físicos del mismo.

Figura 29. Evaporador

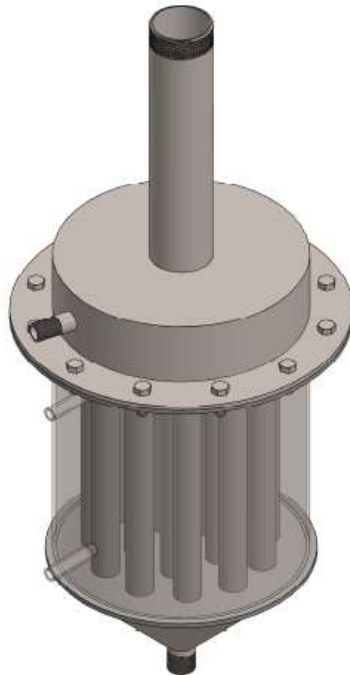


Tabla 15. Parámetros físicos del evaporador

Parámetros	Valores	Para conocer el cálculo de los valores remítase a la página.
Material	Acero inoxidable	108
Número de tubos	17	99
Diámetro de los tubos [in]	1	99
Área de transferencia de calor [m <sup>2</sup> ]	0,28	101
Longitud de los tubos [m]	0,25*	101
Coefficiente global de transferencia de calor $\left[\frac{W}{m^2 \cdot C}\right]$	1390	105

Figura 30. Brida evaporador



\* En los cálculos realizados con el programa EES se obtuvo una longitud del tubo de 23 cm. En la tabla 15 se muestra 25 cm debido que el equipo se calculó asumiendo que no habían pérdidas de calor con el ambiente. Además por razones de construcción al realizar montaje de los tubos con la brida se perdían aproximadamente dos centímetros de longitud.

**8.2.3 Sistema de retiro de calor del condensador.** De acuerdo a los cálculos realizados se requiere que se retire al condensador para que cumpla con su función  $1,327 [Kw] \rightarrow 0.38 [TRF]$ , teniendo en cuenta que se dispone de agua a  $27^{\circ}C$  y una temperatura ambiente de  $26^{\circ}C$  y que se quiere que haya un incremento en la temperatura del agua de  $3.5^{\circ}C$  en su paso por el condensador; se calculó que para obtener el retiro de calor nombrado anteriormente se necesita un flujo másico de  $0.09 \left[ \frac{kg}{s} \right] \rightarrow 5.4 \left[ \frac{L}{min} \right]$

El equipo que se ajustó a los anteriores requerimientos fue un intercambiador de calor enfriado por aire realizando los siguientes cálculos.

$$Q_{a\text{ retirar}} = 1327 [w]$$

$$\dot{V}_{\text{agua}} = 5.4 [Lpm]$$

Este valor fue estandarizado con el catálogo de bombas

$$\dot{V}_{\text{agua estandarizado}} = 10 [Lpm]$$

Fórmula para la selección de intercambiadores de calor agua aire

$$Q = K * (T_{w_1} - T_{a_1}) [W]$$

Donde K significa la cantidad de calor transferido por cada  $^{\circ}C$  o  $^{\circ}F$  de diferencia de temperatura.

- Con este valor de flujo volumétrico se dirigió a la tabla de selección de equipos y se seleccionó el GDWQC57 el cual posee un  $K = 30000 \left[ \frac{W}{100^{\circ}C} \right]$  ver ANEXO A catálogo intercambiador de calor agua-aire donde se muestra la gráfica donde se extrajo este valor.

$$T_{w_1} = 30.5 [^{\circ}C], \text{ Temperatura de entrada del agua al intercambiador}$$

$T_{a_1} = 26[^\circ\text{C}]$ , Temperatura del aire a la entrada del intercambiador en un caso de un día soleado de verano bajo sombra en Bucaramanga.

$$Q = 30000 \left[ \frac{\text{W}}{100^\circ\text{C}} \right] * (30.5 - 26)$$

$Q = 1350[\text{W}]$ , cumple con los requerimientos para las temperaturas bajo sombra del aire ambiente más altas del año en Bucaramanga.

Como se disponía de una torre de enfriamiento en el laboratorio de sistemas térmicos se decidió utilizarla como sustituto del intercambiador de calor enfriado por aire por razones de índole económica, además de que esta contaba con una capacidad de enfriamiento más alta de la requerida por el equipo de condensación. Esta torre cuenta con las siguientes características<sup>26</sup>:

- capacidad de retiro de calor 50000 BTU/h → 14653 J/s
- Flujo másico de la bomba 26 LPM

En la figura 31 muestra la torre de enfriamiento del laboratorio de sistemas térmicos.

---

<sup>31</sup> Datos tomados tesis de grado: RUEDA. Gerson .NIEVES. Carlos. Torre de enfriamiento modelo para las pruebas de laboratorio. Bucaramanga, 1998. 134 y 52 p.

Figura 31. Torre de enfriamiento



**8.2.4 Bomba de vacío.** Para seleccionar la bomba de vacío, el primer parámetro que se tomó en cuenta fue el nivel de vacío que se requería en el condensador, su cálculo se puede observar en la tabla 11 y su valor es de 10700 [pa] absolutos. Otro parámetro importante fue el flujo volumétrico para obtener el tiempo necesario para alcanzar el nivel de vacío. Para esto se realizó el cálculo del volumen con ayuda del programa EES, en los sectores en donde el equipo estaba a esa presión. Para observar el cálculo del volumen y el tiempo remítase al ANEXO D.

La bomba de vacío que se ajustó a estos parámetros fue la QUALITY - 800 mostrada en el figura 32 con la principales características que se observan en la tabla 16, esta es una bombas compacta y rotativa de paletas en baño de aceite de dos etapas. Desarrolladas específicamente para servicios de A/A y Refrigeración.

Altos niveles de vacío, tiempos de evacuado reducidos y bajo nivel sonoro. Diseño de vanguardia y moderna tecnología empleada en su fabricación. Aleación aluminio de la carcasa y asa ergonómica para el fácil transporte.

Motor Eléctrico con protección incorporada y base anti vibraciones.

Figura 32. Bomba de vacío Quality 800



Fuente: GD. Catálogo de productos. Bomba de vacío 8 favor cool. (En línea). [Santiago, Chile] Disponible en Internet: <http://www.gd.cl/catalogo-pro.php?idcat=10&idpro=299>

Tabla 16. Información Técnica bomba de vacío Quality qvp 800

	<b>Unidades</b>	<b>valor</b>
<b>voltaje</b>	voltios	110
<b>Frecuencia</b>	Hertz(Hz)	60
<b>Capacidad</b>	Litros por minuto L/min	198
<b>Desplazamiento</b>	Pies cúbicos por minuto (CFM)	8
<b>Máximo vacío</b>	Mbar Pa	0,1 10
<b>Motor</b>	HP	3/4
<b>Instalación de entrada</b>	Pulgadas (in)	¼ y 3/8

<b>Dimensiones</b>	Milímetros (mm)	395x145x260
<b>Peso neto</b>	kilogramos (Kg)	16,5
<b>Capacidad del aceite</b>	Mililitros (ml)	600

**8.2.5 Bomba centrífuga para la recirculación en el circuito de suministro de calor para evaporador y circuito de condensación.** La bomba que se utiliza en el circuito de calentamiento para la recirculación del agua caliente y recirculación de agua fría en circuito de condensación fue seleccionada de acuerdo a los flujos necesarios para transferir el calor para evaporar y para condensar. Estos flujos fueron:

$$0,12 \left[ \frac{Kg}{s} \right] \rightarrow 7,2 \left[ \frac{L}{min} \right] \text{ Para el circuito de calentamiento}$$

$$0,09 \left[ \frac{Kg}{s} \right] \rightarrow 5,4 \left[ \frac{L}{min} \right] \text{ Circuito de condensación}$$

Se estandarizaron los valores y se eligió una bomba de PLASET ITALY de 10 L/min la cual se muestra en la figura 33 y en seguida en la tabla 17 se observa la ficha técnica.

Figura 33. Bomba centrífuga



Fuente: Es. Catálogo de productos. Bomba centrífuga. (En línea). [Guadalupe, México] Disponible en Internet: <http://www.refaccionesfernandosepulveda.com/provedores-mayoristas.html>

Tabla 17. Ficha técnica bomba PLASE-ITALY

PLASE- ITALY	
<b>código</b>	61889
<b>voltaje</b>	127 AC
<b>frecuencia</b>	60 HZ
<b>capacidad</b>	50 W
<b>flujo volumétrico</b>	10 LPM
<b>diámetro de entrada</b>	30 mm
<b>diámetro de salida</b>	22 mm

**8.2.6 Resistencia eléctrica.** Para escoger la resistencia indicada que se muestra en la figura 34, se toma el valor del calor a suministrar con los cálculos anteriormente realizados ( $Q = 1327 \text{ Watt}$ ) seleccionando una resistencia con las siguientes características:

- Elementos tubulares en cobre niquelado de 0.8 mm.
- Cabezales roscados de latón estampado.
- Soldadas con aleación de cobre para tubo de cobre.
- Tensión normalizada 230V.
- 1500 Watts.

Figura 34. Resistencia eléctrica modelo NA008C



Fuente: JCD. Especializados en la fabricación de resistencias eléctricas. Resistencias tipo tubulares para uso en inmersión. (en línea). [Lima, Peru] Disponible en Internet: <http://jcdresistencias.galeon.com/resist4.htm>

**8.2.7 Tubería evaporador-resistencia.** En la figura 35 se muestra la manguera industrial transparente de diámetro  $\frac{1}{2}$  pulgada, la cual fue seleccionada debido a su flexibilidad y soporte térmico de la temperatura de agua de circuito de calentamiento.

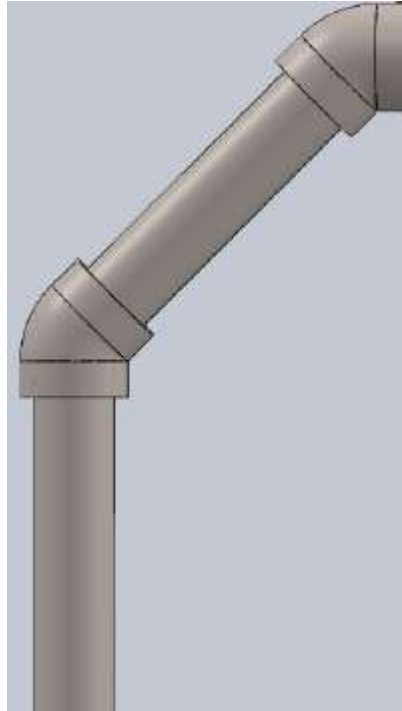
Figura 35. Manguera industrial transparente



Fuente: MANGUERAS. Mangueras industriales. Mangueras para jardín. (En línea). Disponible en Internet: <http://www.ferreteriacalzada.com/pdfsVentasIndustriales/39Mangueras.pdf>

**8.2.8 Tubería evaporador-condensador.** La conexión de evaporador al condensador se hace por medio de tubería y accesorios de acero inoxidable diámetro 2 pulgadas como se muestra en la figura 36.

Figura 36. Tubería evaporador-condensador



**8.2.9 Tubería condensador-torre de enfriamiento.** Se seleccionó tubería industrial transparentes de diámetro de 1 *pulgada* y acoples en "U" en poliuretano como se observa en la figura 37, debido a su flexibilidad.

Figura 37. Acople en "U" poliuretano



**Fuente:** Es. Catálogo de productos. Manguera. (En línea). [Guadalupe, México] Disponible en Internet: <http://www.refaccionesfernandosepulveda.com/linea-blanca/manguera-s-lav-whirlpool.html>

**8.2.10 Controlador de temperatura.** En figura 38 se muestra el equipo de control de temperatura (pirómetro), el cual es un aparato idóneo para realizar mediciones de precisión de temperaturas sin contacto operando por medio de un control on-off.

Figura 38. Pirómetro



**Fuente:** JM. Industrial technology S.A. de C.V. Controles de temperatura. (En línea). Disponible en Internet: <http://www.jmi.com.mx/instrumentacion/controles-temperatura.html>

- **Descripción del pirómetro**

Contador digital de la temperatura de XMT\*

Método de la visualización: Visualización de LED

Error básico: Menos que 1.0%FS

Capacidad de contacto de la salida: CA 220V 3A

Este es un regulador de temperatura digital de serie XMTG-2301 adopta un indicador digital de la temperatura de medición y el método de control de la proporción de tiempo. Cuenta con una alta precisión, buena confiabilidad, gran amortiguación, de fácil instalación y otras ventajas. Este regulador es ampliamente utilizado como la medida de la temperatura y control automático en industria ligera y pesada, tal como metalurgia, producto químico, electrónico, maquinaria, materia textil, plástico, refrigeración, tratamiento médico, horno eléctrico por nombrar algunas industrias.

- **especificación de Técnica de pirómetro :**

- Tipo de la entrada de información: J

- Medida y rango del control: 0~399C

- Exactitud:  $\leq 1.0\%F$ .  $S \pm 1B$

- Rango de la venda proporcional:  $\pm 12C$

- Período de control:  $30 \pm 3Sec$

- Capacidad de contacto de la salida: 220VAC, 5A (carga de resistencia)

- Fuente de alimentación: CA 85~242V, 50/60HZ

- Consumo de energía: <3W

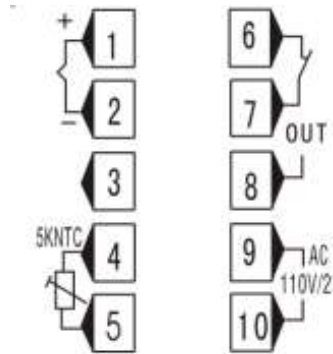
- Agujero total de la talla y de la instalación (milímetro): 48x 48x 110; 44x 44

- Entorno de trabajo de: Temperatura: 0~50C; Higrometría: < 85%RH, fuera corroen el gas.

- **Esquema de conexión**

En la figura 39 se observa un esquema de las conexiones del pirómetro las cuales se detallan a continuación.

Figura 39. Esquema de conexión del pirómetro



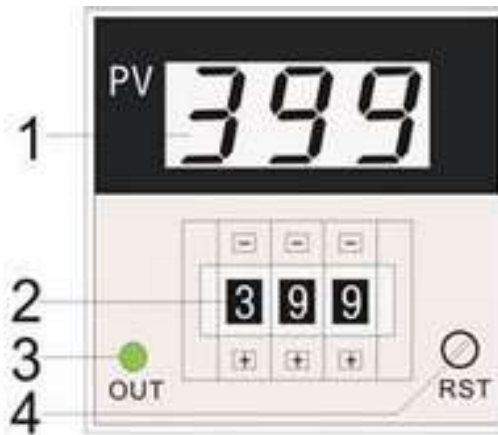
Fuente: DatasheetXMTG-2301-J digital temperature controller Operation Instruction

- El terminal N ° 1 está conectado con el ánodo (+) del sensor de tipo de termocupla y terminal N°2 está conectado con el negativo (-) del sensor termopar tipo j
- El terminal N ° 4 y N ° 5 se ha conectado con la resistencia térmica NTC5K
- El terminal N ° 6, N ° 7 y N ° 8 son salida de relé. Cuando la luz verde se encienda, la terminal N ° 7 N ° 8 están conectados y el terminal N ° 6 y N ° 7 están desconectados. Cuando la luz verde de se apaga, el terminal N ° 7 n N ° 8 se desconectan y el terminal N ° 6 y N ° 7 se conectan.
- El terminal N ° 9 y N ° 10 son la fuente de alimentación de CA85- 242V.

- **Instrucción del tablero**

La figura 40 muestra el tablero de control del pirómetro y continuación se describen con detalle cada uno de ellos.

Figura 40. Tablero de control pirómetro



Fuente: datasheet XMTG-2301-J digital temperature controller Operation Instruction

- El N°1 es la ventana de indicación del valor medido.
- El N°2 es el dial de ajuste: a través de oprimir el + y - de cada selector para ajustar el valor que se desea de set point.
- El N°3 es el indicador de salida: la luz verde del tablero indica el estado.
- El N°4 Potenciómetro RST: cuando entre la temperatura ambiente y la temperatura medida tiene estática, puede utilizar este potenciómetro para la regulación.

#### • Modo de uso

Conecte la fuente y el sensor de acuerdo con la conexión Esquema, a continuación, se muestra la temperatura real medida. Cuando la temperatura ambiente está por debajo del set piont cambia de estado el relé enciéndose el led verde en este momento la carga comienza a calentarse y su temperatura está subiendo. Si la temperatura que se muestra en la ventana de indicación del valor medido es mayor que la del set point el relé cambia de estado y el led verde se apaga.

Después de la entrada de temperatura real medida en la banda proporcional, el relé de arranque de la apertura y cierre de acuerdo con la regla de control.

- **El mantenimiento y la atención del controlador.**

- La Termocupla debe ser puesta en el lugar donde se puede medir la temperatura real dentro del medio a controlar y debe tener un buen aislamiento.
- Antes de encender el controlador, por favor revise cuidadosamente para ver si toda la conexión es correcta y que la termocupla coincida con el tipo de entrada del controlador.
- Al calentar inicialmente, aunque el poder de la resistencia en el interior del medio a controlar se ha apagado, la temperatura del medio a controlar puede seguir subiendo debido a la inercia de calentamiento. Así que es mejor establecer alrededor del 80% de la temperatura que desea ajustar normalmente antes de encender el controlador cada vez. Después el controlador lleva a cabo el "control on-off" por varias veces, a continuación, establezca el valor de temperatura que desea establecer con normalidad, con el fin de evitar el exceso creciente.
- Si el controlador muestra anormalmente, verificar el sensor para ver si su conexión es de circuito abierto o cortocircuito, compruebe también si la tensión de trabajo del controlador es normal.

**8.2.11 Relé de estado sólido.** El relé de estado sólido es un dispositivo electrónico que consta de dos partes la bobina y los contactos. Al energizar la bobina cambian de estado sus contactos actuado como un interruptor es decir, si antes de energizar la bobina los contactos se encuentran normalmente cerrados cuando se energice los contactos se cerraran automáticamente. Además este tipo de relé permite que con una entrada variable de corriente a la bobina produzca

una salida proporcional en la conexión de los contactos permitiendo controlar la intensidad de la corriente que transita por dichos contactos.

Debido a que el relé que tiene incorporado el pirómetro es de baja capacidad hablando en términos de corriente y como se necesitaba controlar la resistencia eléctrica (temperatura) alimentada con 110 voltios y un amperaje de 12,8 este no estaba en la capacidad de realizar esta tarea directamente por lo que se optó por disponer de un segundo relé de estado sólido con mayor capacidad y comandado por el pirómetro.

En la figura 41 se observa el relé de estado sólido que fue seleccionado para este sistema:

Figura 41. Relé de estado solido

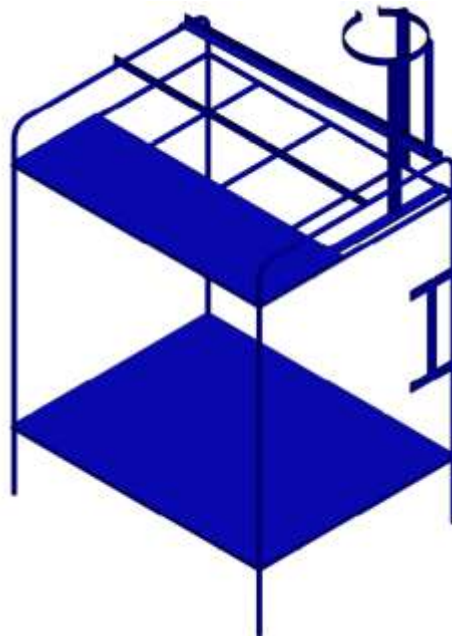


- Características:
  - serie TD48A25
  - Aislamiento óptico
  - input 4-32 Vdc

- output 25 A/(24-575) V AC
- 600 voltios de voltaje blocking
- Detector de cruce por cero
- Alta capacidad de picos de corriente
- Puente de snubber
- 4000 Voltios de aislamiento
- RTVSS, Sistema de protección de transientes para relés de entrada 20-275 Vac.

**8.2.12 Estructura.** En la figura 42 se muestra la estructura del sistema, esta se construyó en tubos acero estructural de diámetro  $\frac{1}{2}$  in, además cuenta con diferentes soportes que facilitan en ensamble total del sistema.

Figura 42. Bastidor del sistema



## **9. MONTAJE Y OPERACIÓN DEL SISTEMA DE VAPORACIÓN AL VACÍO**

Después de realizar los diferentes cálculos y de escoger cada uno de los componentes del sistema se llevó a cabo la construcción. Sin embargo al tener el primer diseño ya montado y ponerlo en funcionamiento, se encontraron algunas dificultades, las cuales se fueron solucionando con el fin que el equipo cumpliera con los objetivos en su totalidad. Para no confundirnos es realmente útil separar la máquina en los siguientes subsistemas:

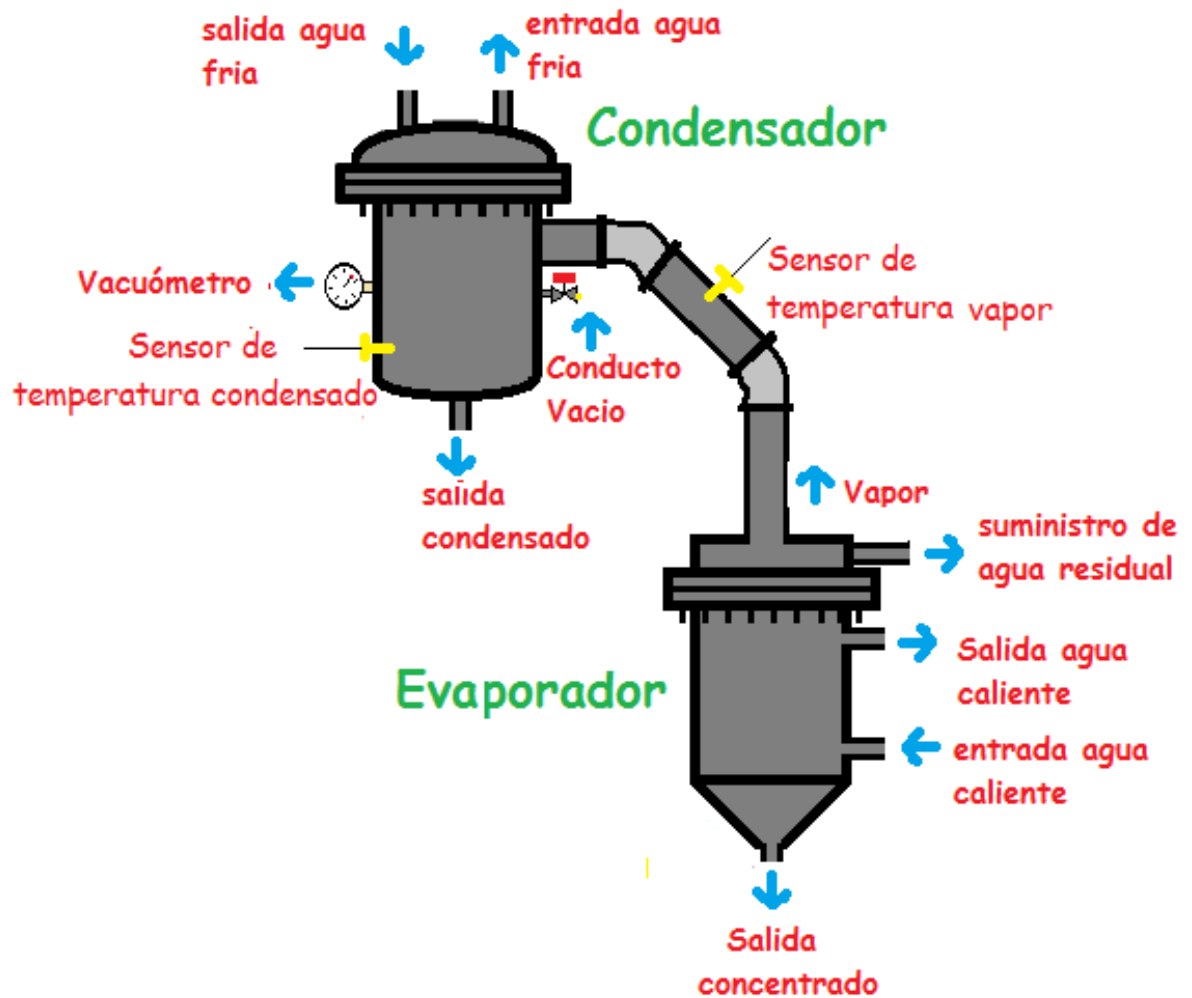
- evaporador- condensador
- producción de vacío
- suministro de calor
- retiro de calor
- tanque auxiliares
- control

### **9.1. SUBSISTEMA EVAPORADOR CONDENSADOR.**

Este subsistema está compuesto de un evaporador de tipo calandria el cual tiene la función de evaporar el agua residual. Este cuenta con una salida de líquido concentrado y de vapor además de un suministro de agua residual. El aporte de calor está dado indirectamente por una resistencia eléctrica que le sede energía calórica a un circuito de agua recirculado por bomba y esta a su vez realiza el intercambio de calor con el evaporador. Otro componente de este subsistema es el condensador, este es un intercambiador de calor de tubos en U, el cual tiene la función de condensar el vapor proveniente del evaporador; para realizar esta función cuenta con la entrada de agua fría y de vapor a condensar, también cuenta con salidas para el condensado y del agua fría después de cumplir con su función de retirar calor como se observa en la gráfica 43. Para observar el nivel de

vacío, el condensador posee un vacuómetro\*. Para generar el vacío en este subsistema en el condensador cuenta de un conducto que esta acoplado a la bomba de vacío.

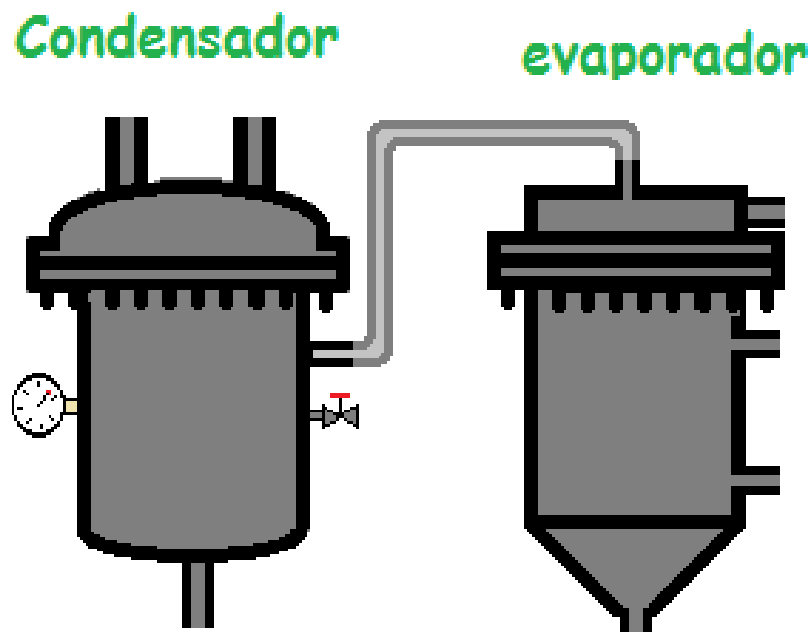
Figura 43. Esquema del subsistema evaporador- condensador



\* Medidor analógico de presiones por debajo y con respecto a la presión atmosférica.

Durante el proceso de montaje se presentaron algunos problemas el primero de ellos fue que al ensamblar el condensador y evaporador a la misma altura como se muestra el figura 44, y al accionar el sistema se observó que al sacar la muestra de condensado el agua salía contaminada por lo cual había problemas de arrastre de líquido\*, debido a que en el trayecto del vapor las gotas que quedaban en el camino no podían devolverse al evaporador sino que seguían hacia el condensador.

Figura 44. Esquema primer montaje evaporador-condensador

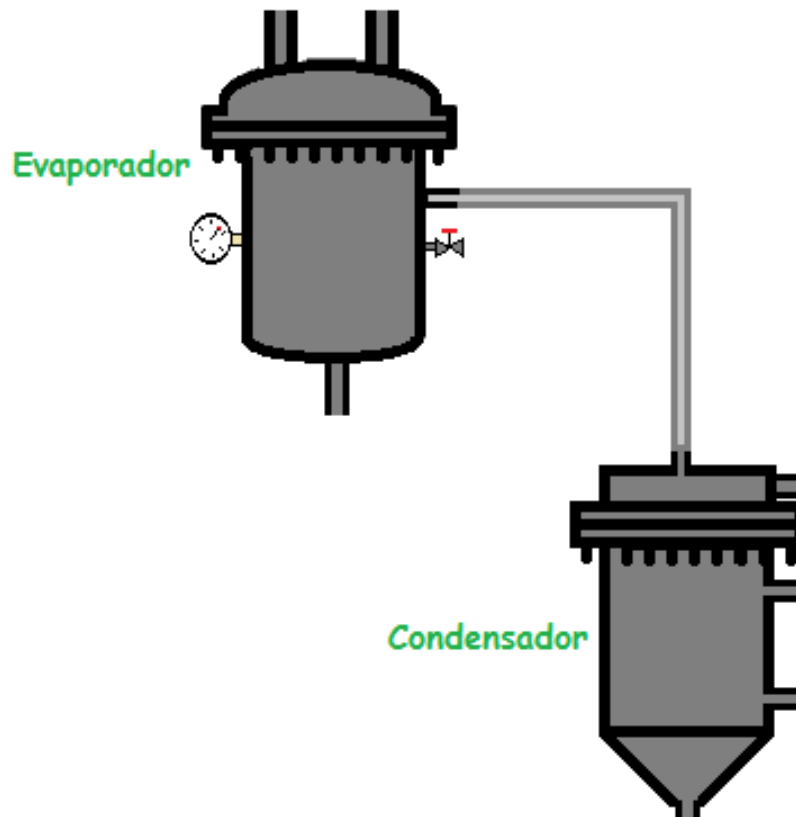


---

\* Fenómeno en el cual el vapor transporta líquido y no permite la separación de los mismos

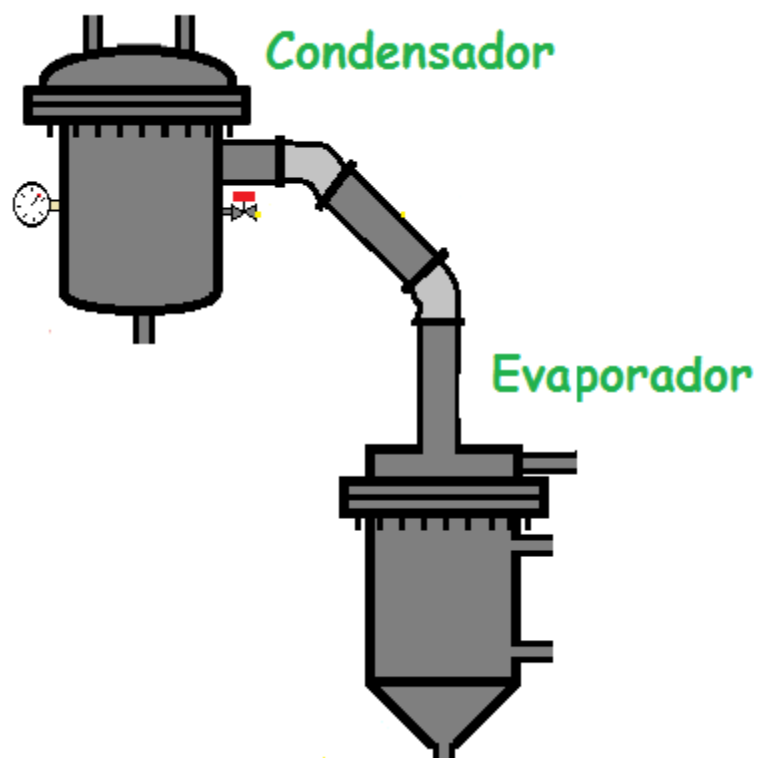
Para solucionar este problema se toma la decisión de elevar el condensador 50 cm, con el fin de que las gotas que quedaban en el camino volvieran al evaporador y el condensado no se contaminara, pero al colocar en funcionamiento el sistema se encontró que seguía arrastrando gotas de líquido hacia el condensador ,en la figura 45 se muestra este tipo de arreglo. Se pensó que el problema era que al tener una ducto pequeño de diámetro  $\frac{1}{4}$  de pulgada del evaporador al condensador se aumentaba la velocidad del vapor y esto hacia que las gotas de líquido se fueran hacia el condensador.

Figura 45. Esquema segundo montaje evaporador-condensador



Este problema se solucionó cambiando la tubería que de un  $\frac{1}{4}$  por una tubería de 2 pulgadas, con el fin de que no aumentara tan drásticamente la velocidad del vapor y así no hubiera arrastre de líquido hacia el condensador como se observa en la figura 46. Al colocar en funcionamiento el sistema con estos cambios se observa que funciona adecuadamente.

Figura 46. Esquema del montaje final

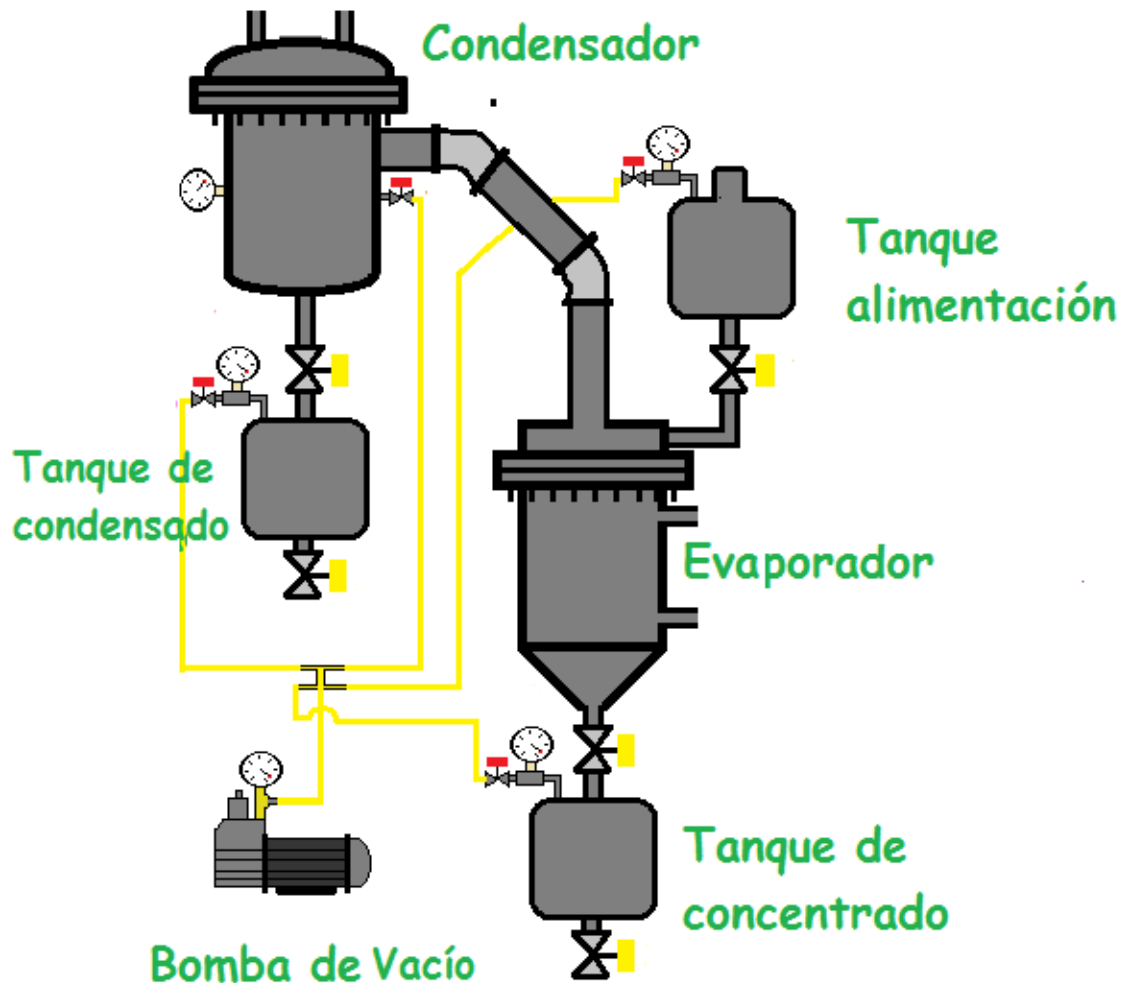


## 9.2. SUBSISTEMA DE PRODUCCIÓN DE VACÍO.

Este subsistema está compuesto principalmente por una bomba de vacío rotativa de aceite de 2 etapas y un sistema de mangueras que están acopladas desde la bomba de vacío hasta el tanque de concentrado, tanque de condensado, condensador y tanque de alimentación; a la entrada de cada uno de los equipos

nombrados anteriormente se dispuso de una válvula y de un vacuómetro con el fin de independizarlos y conocer su nivel de vacío. Este subsistema se puede observar con mayor claridad en la figura 47.

Figura 47. Esquema Subsistema de producción de vacío

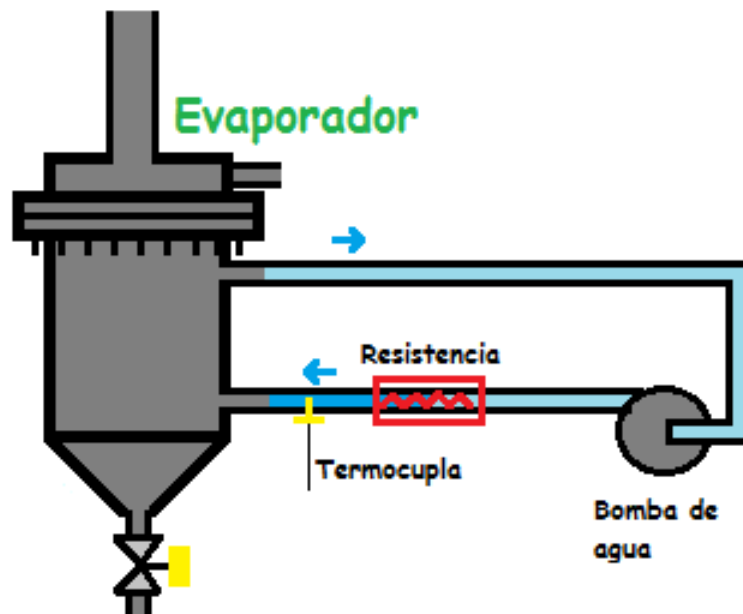


### 9.3. SUBSISTEMA SUMINISTRO DE CALOR.

Este subsistema está compuesto por una resistencia eléctrica que transforma la energía eléctrica en calor para calentar el agua, una bomba centrífuga que cumple

con la función de recircular el agua del subsistema, una termocupla que censa la temperatura para luego controlar la resistencia he indirectamente la temperatura de agua y un conducto de manguera industrial aislada térmicamente. En la figura 48 se observa la disposición de los componentes anteriormente nombrados.

Figura 48. esquema del subsistema de suministro de calor

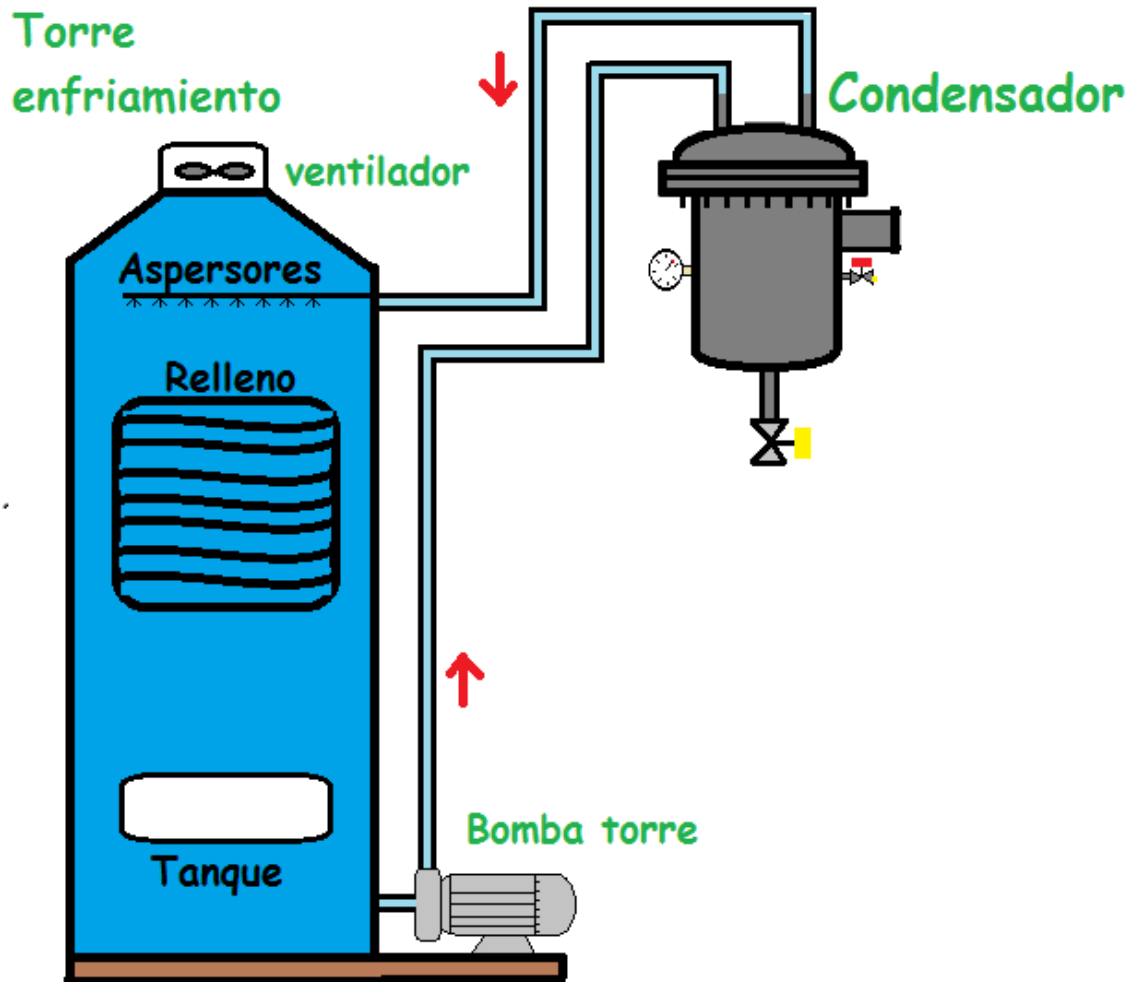


#### 9.4. SUBSISTEMA DEL RETIRO DE CALOR

El subsistema de enfriamiento está compuesto principalmente por una torre de enfriamiento. Esta posee una bomba centrífuga que recircula el agua de enfriamiento, un ventilador dispuesto en la parte superior para inducir el flujo de aire, aspersores para distribuir la masa de agua sobre el volumen del relleno, relleno aumentar el área de transferencia de calor entre el agua y el aire además retardar el tiempo que se demoran las gotas de agua que caen de los aspersores dentro de la torre y tanque para tener disponible el agua para la recirculación. Estos elementos le permiten cumplir con el objetivo de enfriar el agua. Se debe

alimentar el tanque con agua periódicamente con el fin de restituir la masa de agua que absorbe el aire al pasar por la torre. En la figura 49 se observa el esquema del subsistema del retiro de calor descrito anteriormente.

Figura 49. Esquema del subsistema del retiro de calor



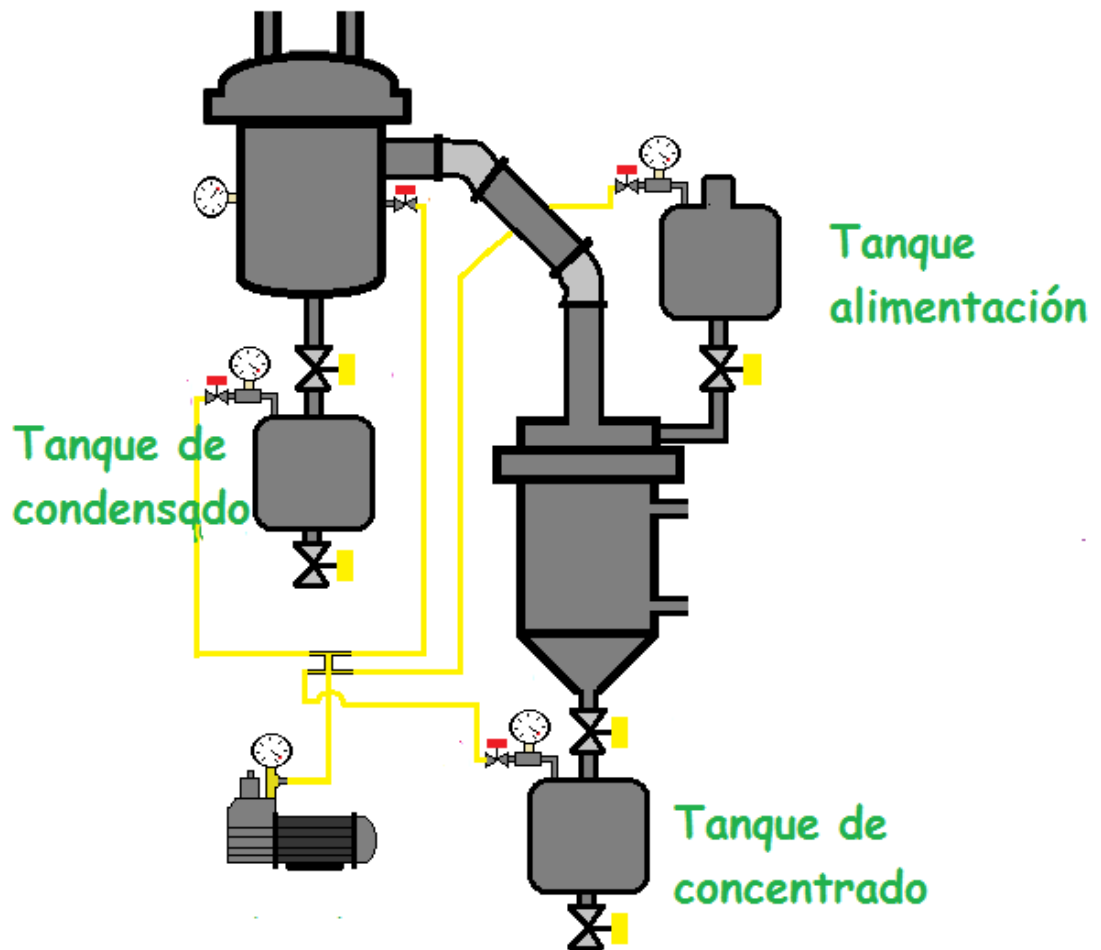
### 9.5. SUBSISTEMA TANQUES AUXILIARES.

A continuación se describen los tres tanques que complementan el funcionamiento de subsistema evaporador-condensador, estos son:

- El tanque de alimentación: El cual cumple la función de almacenar agua a tratar para el posterior suministro al evaporador sin tener que parar la producción de vapor. Está compuesto de una válvula, una tapa y vacuómetro en su parte superior y una válvula en la parte inferior, la tapa cumple la función de permitir el llenado y el respectivo sello de este. La válvula superior permite aislarlo de subsistema de producción de vacío además de habilitarlo para la generación del mismo. El vacuómetro muestra en nivel de vacío presente en el tanque. Por último la válvula inferior cumple con la tarea de aislar, y de permitir el flujo hacia el evaporador.
- El Tanque de concentrado : Se dispuso en la parte inferior de evaporador con el fin de extraer el concentrado sin perder el vacío en el subsistema evaporador condensador, está compuesto por dos válvulas y un vacuómetro en su parte superior y una válvula en la parte inferior . la válvula superior que conecta el evaporador con el tanque permite con su apertura el flujo por gravedad del concentrado. La otra válvula permite aislarlo de subsistema de producción de vacío además de habilitarlo para la generación del mismo. El vacuómetro muestra en nivel de vacío presente en el tanque. Finalmente la válvula inferior permite extraer el concentrado en un recipiente que se encuentra a presión atmosférica para su disposición.
- El Tanque de condensado: Este está dispuesto en la parte inferior del condensador, su funcionamiento es muy similar al tanque de concentrado explicado anteriormente, equipado con los mismos componentes que cumplen cada uno con la misma función, la única diferencias es que al abrir la válvula inferior se extrae el condensado que es el producto del proceso evaporación al vacío.

En la figura 50 se observa un esquema donde se muestra la disposición espacial de los tanques y sus respectivos componentes.

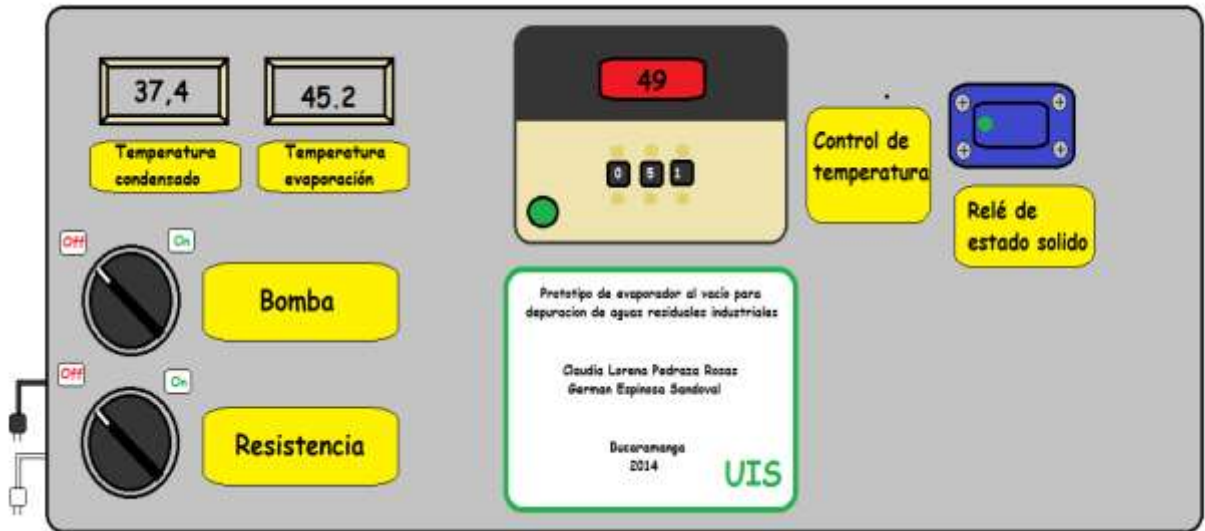
Figura 50. Esquema del subsistema tanques auxiliares



### 9.6. SUBSISTEMA DE CONTROL.

Para controlar el funcionamiento de los componentes como la bomba de recirculación de agua caliente, la resistencia y conocer el valor de la temperatura del vapor generado y el condensado se dispone de un tablero de control mostrado en la figura 51.

Figura 51. Esquema del tablero de control



Luego de que cada subsistema funcionara adecuadamente se obtuvo el montaje final. En la figura 52 se observa un esquema general del este montaje y en la figura 53 una foto del equipo real.

Figura 52. Esquema del sistema de evaporación al vacío para la depuración de aguas residuales

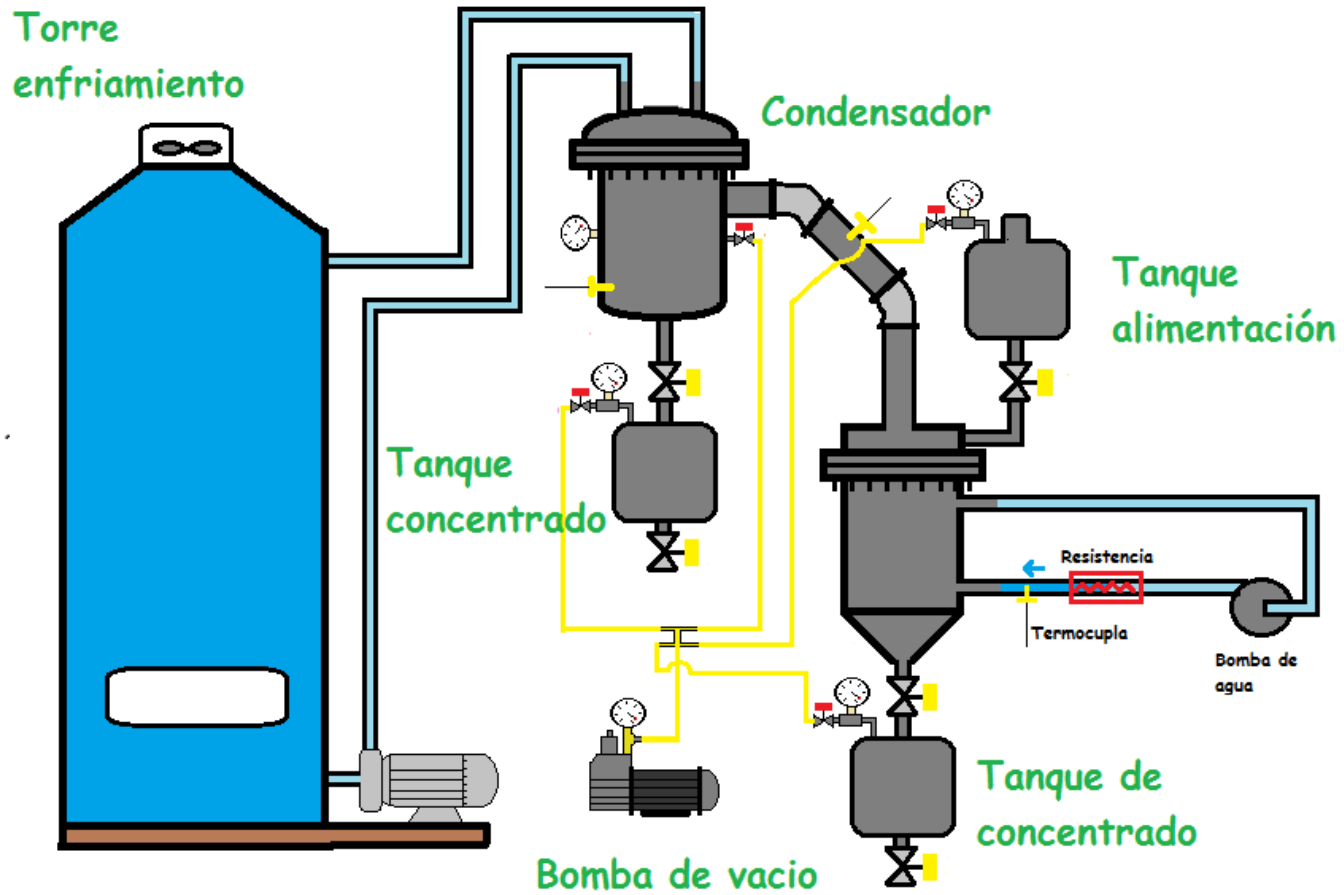


Figura 53. Foto del sistema de evaporación al vacío para la depuración de aguas residuales construido.

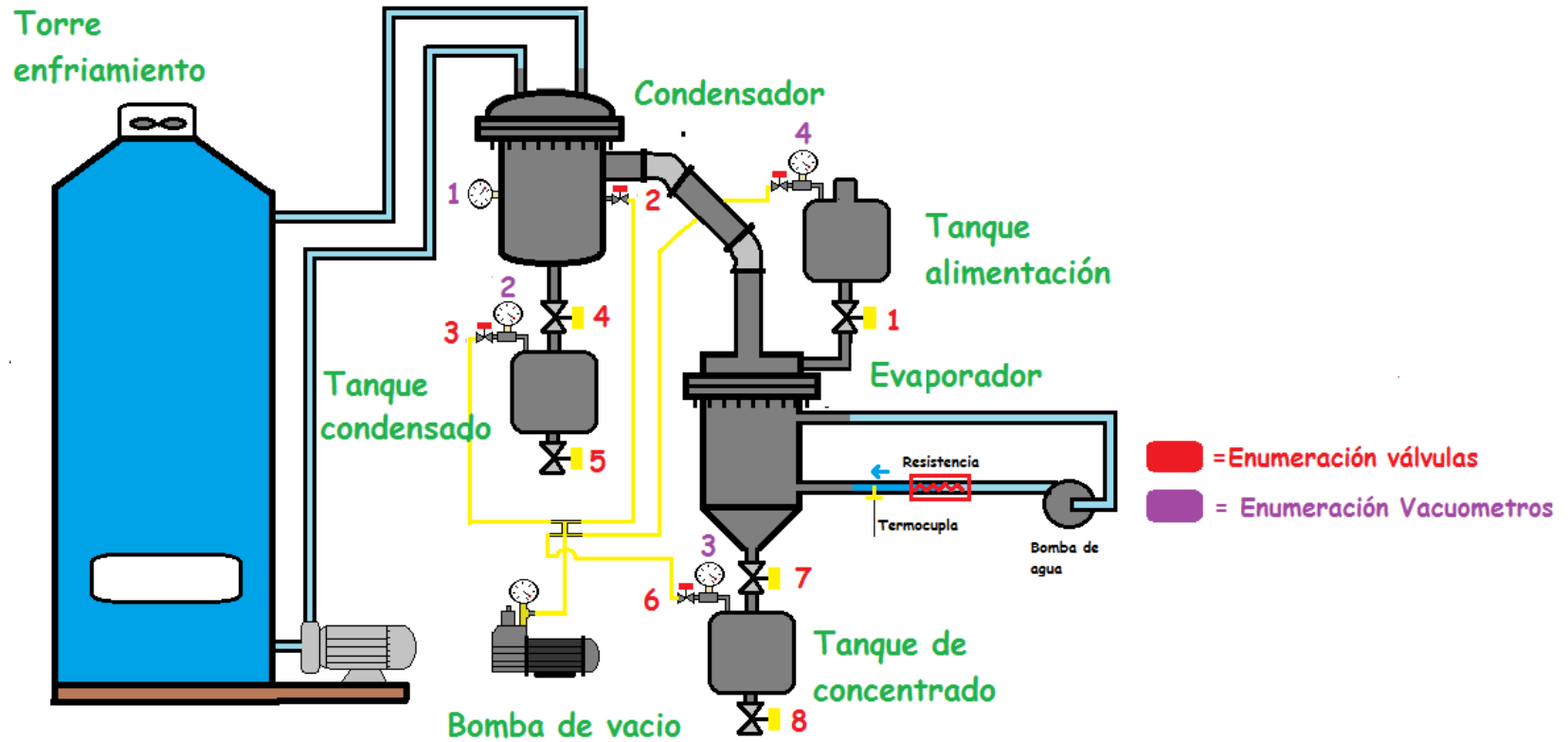


Para tener información sobre otros tipos de evaporadores al vacío remítase al ANEXO F.

### **9.7. SECUENCIA DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA LA DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES.**

Para operar el sistema se deben seguir una serie de pasos para obtener un funcionamiento óptimo del equipo. En la figura 54 se muestra el sistema, en donde cada uno de los equipos tiene su correspondiente nombre y están enumeradas las válvulas y los vacuómetros diferenciadas por colores y la figura 51 muestra un esquema del tablero de control. Con estas dos figuras se comprende con mayor facilidad la secuencia de funcionamiento y de esta manera no dar cabida a equivocaciones a la hora de colocar a operar el equipo.

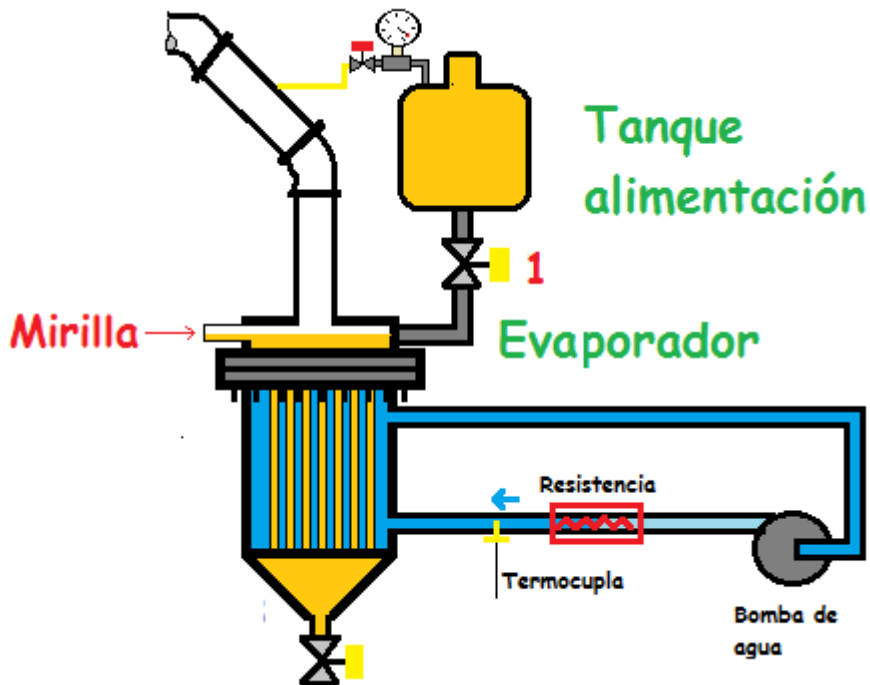
Figura 54. Esquema Sistema de evaporación al vacío para la secuencia de funcionamiento



- Paso 1

Para comenzar el proceso se debe cargar el tanque de alimentación con el agua residual, dejando abierta la válvula (1) con el fin de llenar el evaporador, observar cuidadosamente la mirilla del evaporador, en la cual el nivel no debe exceder la mitad de este. Cuando esté en ese nivel se debe cerrar la válvula (1) y así llenar el tanque de alimentación, para alimentar el evaporador cuando baje el nivel en la mirilla. Seguidamente se verifica que el circuito de calentamiento por resistencia eléctrica contenga agua de no ser así no se debe continuar con la operación del equipo porque esto traería como consecuencia que se funda el material de la resistencia eléctrica y por supuesto su avería. En la figura 55 se observa con más detalle los componentes nombrados para este primer paso.

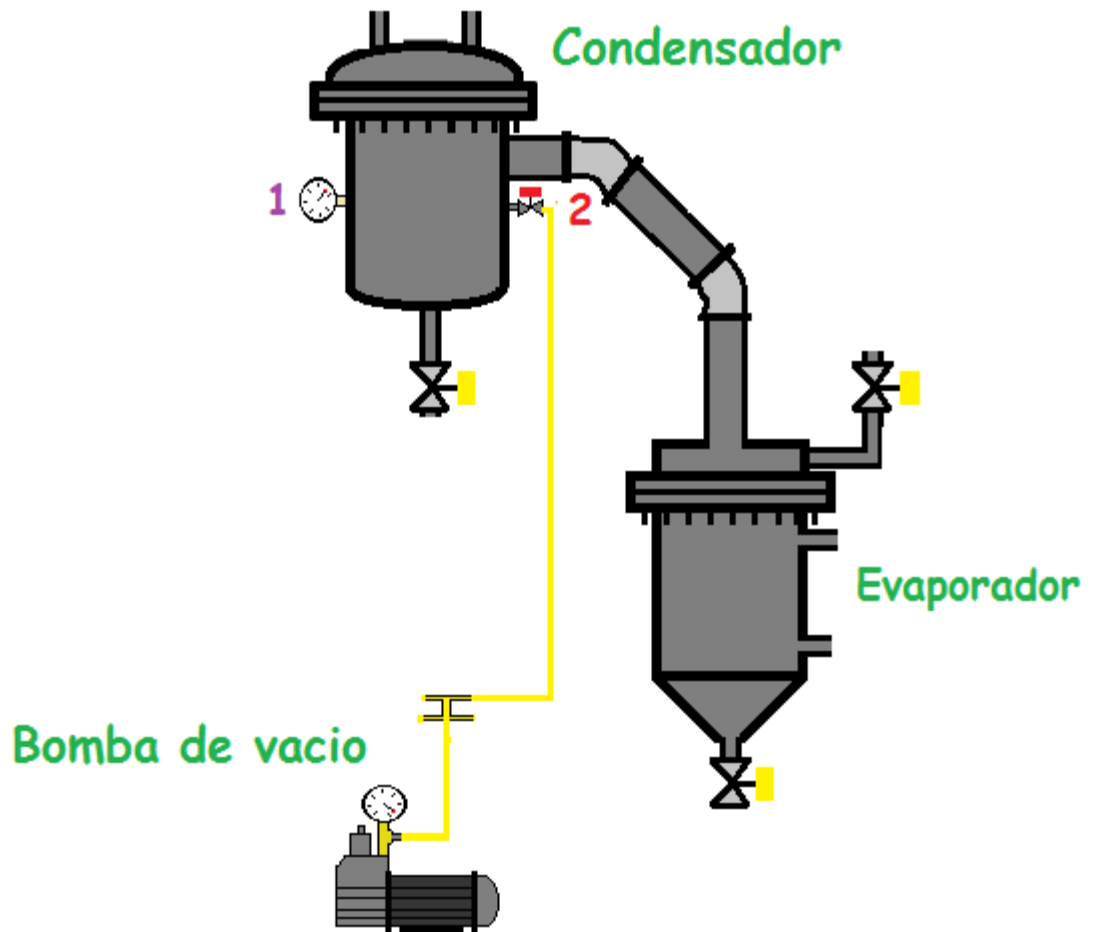
Figura 55. Esquema de componentes del paso 1



- Paso 2

Al tener agua residual en el evaporador se procede a abrir la válvula (2), seguidamente se acciona la bomba de vacío, observando el vacuómetro (1) hasta que este marque 67 cm hg para cerrar la válvula (2). Para facilitar la comprensión de este paso en la figura 56 se muestran cada uno de los componentes nombrados.

Figura 56. Esquema de componentes paso 2



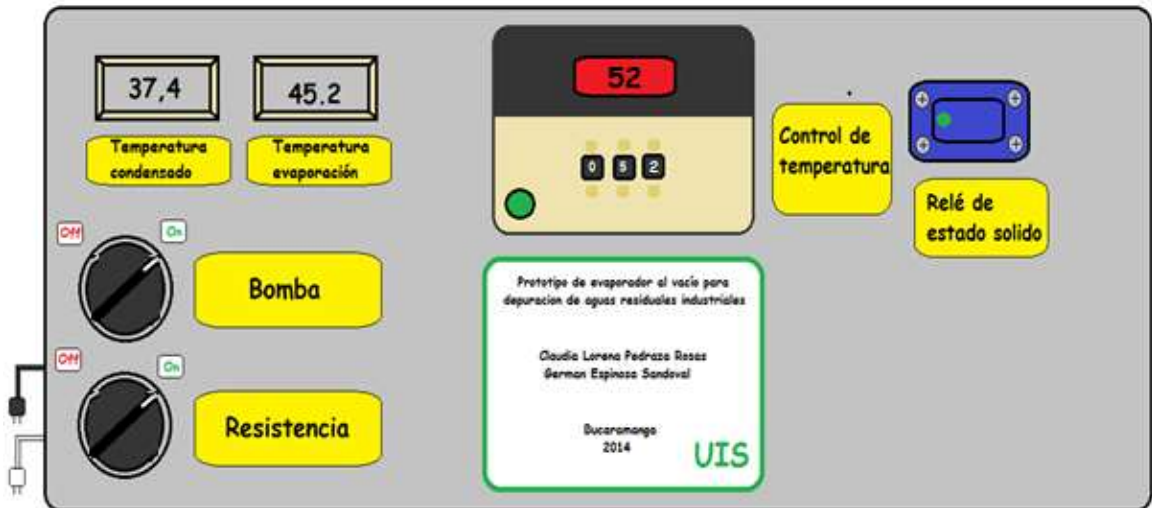
- Paso 3

Al tener el sistema con vacío se pone a funcionar el equipo conectado a la corriente las extensiones blanca y negra, colocando un set point de 52 en el controlador de temperatura; al tener esto listo accione el interruptor de la resistencia y cuando la temperatura en el Pirómetro (Control de temperatura) marque 35 grados se activa el interruptor de bomba que se encuentra en el tablero de control como se muestra en la figura 57. Se deja que la temperatura se eleve y cuando alcance 52 grados centígrados. Inmediatamente se procede a prender la torre de enfriamiento y el ventilador de la misma.

Nota: el set point no debe sobrepasar los 52 grados ya que si sucede esto habrá arrastre de líquido (agua residual), y el condensado saldrá contaminado.

Este punto de funcionamiento óptimo se encontró con una serie de pruebas que se explicaran en el capítulo 8.

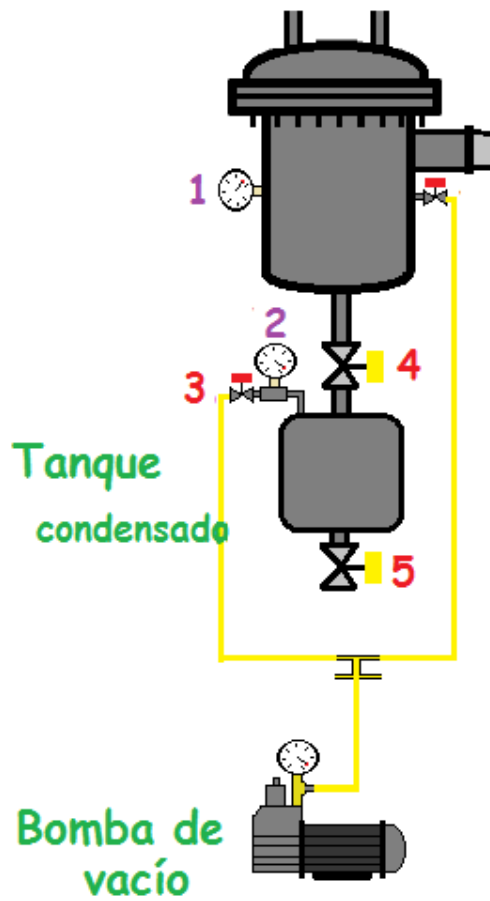
Figura 57. Esquema de la disposición de los componentes Tablero de control para el paso 3



- Paso 4

Para verificar que el condensado no este contaminado, pasado un tiempo aproximadamente de 20 min se debe tomar una muestra, para realizar este proceso se abre la válvula (3), y seguidamente se acciona la bomba de vacío observado conjuntamente el vacuómetro (2) hasta que se alcance un vacío igual al obtenido en el vacuómetro (1) se cierra la válvula (3); posteriormente se abre la válvula (4) por un tiempo aproximadamente de 3 minutos, y después se cierra; cuando esta esté perfectamente cerrada se abre la válvula (5) para la extracción del condensado. En la figura 58 se muestran los componentes anteriormente nombrados para facilitar la realización de este paso.

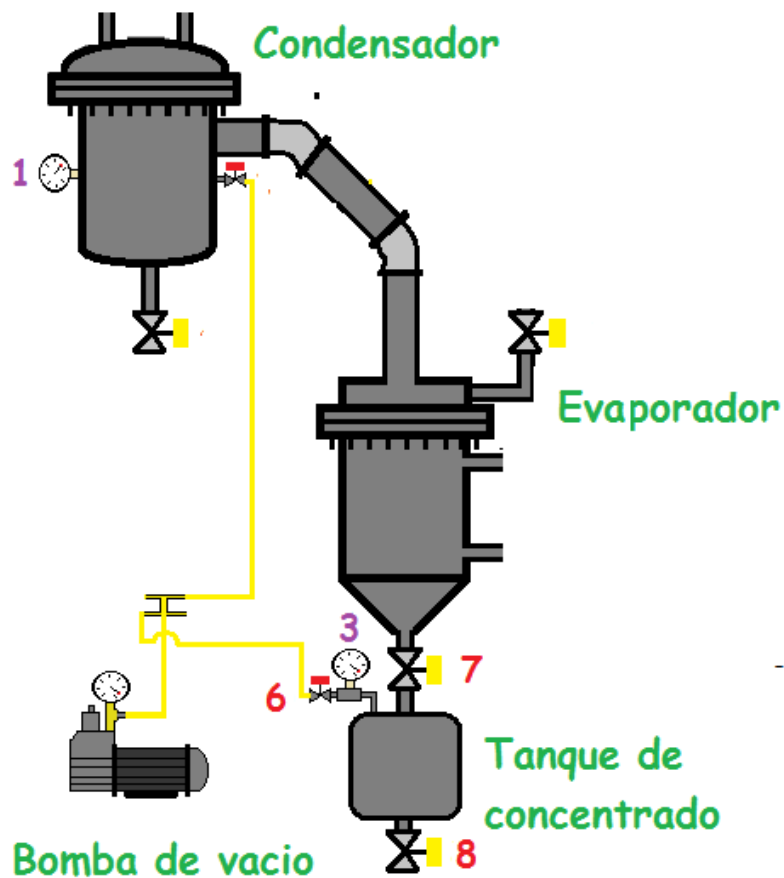
Figura 58.esquema de componentes paso 4



- Paso 5

Si se desea extraer concentrado del el sistema, se debe hacer en un tiempo no menor a una hora de funcionamiento; para realizar este proceso se abre la válvula (6), y seguidamente se acciona la bomba de vacío observado conjuntamente el vacuómetro (3) hasta obtener el mismo vacío que se muestra en el vacuómetro(1) seguidamente se cierra la válvula (6); posteriormente se abre la válvula (7) por un tiempo aproximadamente de 10 segundos, e inmediatamente se cierra; cuando esta esté perfectamente cerrada se abre la válvula (8) extrayendo el concentrado. En la figura 59 se observan cada uno de los componentes anteriormente nombrados.

Figura 59. Esquema de componentes paso 5



## 10. PRUEBAS REALIZADAS

Al tener el prototipo final ya montado completamente, se procedió a realizar diferentes pruebas para determinar que el sistema funcionara adecuadamente. Las pruebas que se realizaron se nombran a continuación:

- Pruebas de puesta a punto
- Pruebas operativas

### 10.1. PRUEBAS DE PUESTA A PUNTO.

Estas pruebas se realizan para verificar si un recipiente es hermético sometándolo a una diferencia de presiones entre su interior y exterior, para verificar que los diferentes recipientes que se utilizaron cumplieran con esta característica se le realizaron las siguientes pruebas.

- Prueba estanqueidad

**10.1.1 Prueba estanqueidad.** Las pruebas de estanqueidad tienen por objeto asegurar la ausencia de fugas en cualquier sistema en el que intervengan fluidos a presiones iguales o distintas a la atmosférica. Debido a que uno de los factores de mayor importancia para tener en cuenta de este sistema es conservar el nivel de vacío se realizaron las siguientes pruebas:

- Prueba hidrostática
- Prueba de vacío con bomba

**10.1.1.1 Prueba hidrostática.** Se sometió cada uno de los recipientes que iban a operar en vacío a una presión manométrica de 30 psi y aplicando agua con jabón en todas las uniones y cordones de soldadura, de esta manera en los lugares donde se presentaban acumulación de burbujas se corrigió la fuga rectificando el respectivo cordón.

**10.1.1.2 Vacío con bomba.** Se utilizó la bomba de vacío para someter el sistema internamente a una presión absoluta de 8 cm de mercurio absolutos dejándolo en ese estado durante un periodo 24 h y verificando con los respectivos vacuómetros pasado el periodo de tiempo de prueba que se mantuviera a esa presión, comprobándose satisfactoriamente que el sistema quedo totalmente hermético .

## **10.2. PRUEBAS OPERATIVAS.**

Se realizaron las siguientes pruebas en el laboratorio para verificar que el sistema depurara los 2kg/h además que este condensado se extrajera libre de contaminaciones.

- Prueba De vacío
- Prueba del punto de funcionamiento
- Prueba de concentración de solidos
- Prueba agua residual empresa avicola

**10.2.1 Vacío en operación.** La prueba se realizó poniendo a funciona el sistema durante una hora alimentándolo con agua de grifo, después de terminar este periodo el nivel de vacío se mantuvo y evidencio que el sistema condenso 2.5 litros.

**10.2.2 Prueba del punto de funcionamiento.** Para encontrar experimentalmente el punto en el cual se aporta el calor necesario para vaporizar un flujo másico de 2kg/h y donde no hubiera arrastre del agua residual se realizaron pruebas con tinte industrial (iris) para obtener una evidencia de calidad del condensado que se pudiera comprobar fácilmente de manera visual a diferentes temperaturas de entrada del agua de calentamiento. Los resultados se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Datos tomados para el punto de funcionamiento

<b>1 hora de funcionamiento presión de vacío 8 cm de Hg absolutos , Tem_ambiente 27,8 °c y Tem_saturación= 47,06</b>				
<b>Datos</b>	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	prueba 4
<b>Temperatura entrada del agua caliente [°C]</b>	45	50	53	52
<b>Temperatura vapor [°C]</b>	38,3	40,8	43,8	41,8
<b>Temperatura condensación [°C]</b>	27,2	29,9	32,5	31,6
<b>Rata de vaporización (kg/h)</b>	0	1,2	3	<b>2,1</b>
<b>Rata de vaporización (kg/s)</b>	0	0,000333333	0,000833333	0,000555555
<b>Entalpia hfg (J/kg)</b>	2403000	2394000	2384000	2389000
<b>Calor de evaporación Kw</b>	0	0,798	1,986666666	1,327222222

<b>voltaje (V)</b>	128	128	128	128
<b>Corriente (A)</b>	12,8	12,8	12,8	12,8
<b>Potencia resistencia (resistencia) [Kw]</b>	1,6384	1,6384	1,6384	1,6384
<b>Temperatura de entrada del condensador [°C]</b>	28	28	28	28
<b>Temperatura de salida del condensador [°C]</b>	28,1	28,1	28,6	28,4
<b>Calor específico del agua <math>\left[\frac{KJ}{Kg^{\circ}C}\right]</math></b>	4,182	4,182	4,182	4,182
<b>Flujo másico de la torre (kg/s)</b>	0,017 <sup>*</sup>	0,017	0,017	0,017
<b>calor visto desde el condensador Kw</b>	0	0,0071094	0,0426564	0,0284376
<b>calidad</b>	no hubo condensado	hubo condensado sin contaminación	hubo condensado contaminado	<b>hubo condensado limpio</b>
<b>Energía (kJ)</b>	0	2872,8	7152	4778
<b>Tiempo encendido resistencia (min)</b>	4,02	28,25	60	45

---

\* valor tomado con la torre de enfriamiento que se encuentra en el laboratorio de sistemas térmicos con la cual se realizaron las pruebas del punto de funcionamiento.

Luego de realizar esta prueba y tomar todos los datos se encontró que con 52 grados a la entrada de agua caliente se condensaron 2.1 kg/h sin presencia de coloración como se muestra en la figura 60. Por cual se llegó a la conclusión que este es el punto de funcionamiento óptimo de sistema de evaporación al vacío.

Figura 60. Resultado del agua tratada con tinte



**10.2.3 Prueba de concentración de sólidos.** Para obtener la masa de solidos que se recuperaban se alimentó el evaporador con una cantidad de cuatro litros de agua residual proveniente de la empresa avícola, luego se puso en funcionamiento el sistema hasta que no se produjera vapor, cuando esto ocurrió se extrajo el concentrado pero se observó que este no salió suficientemente saturado de sólidos, en seguida se decidió seguir evaporando el agua concentrada

hasta que quedaran solamente los sólidos, esto se realizó en una estufa convencional y se obtuvieron los siguientes resultados.

Para una cantidad de 4 litros se obtiene una masa de sólidos de 10 gramos los resultados se muestran en la Figura 61.

Figura 61. Sólidos recolectados



**10.2.4 Prueba agua residual empresa avícola.** Para comprobar si el sistema de evaporación al vacío puede ser usado en la industria para el tratamiento de aguas, este debe cumplir con la normatividad vigente para el vertimiento de aguas residuales industriales, por esta razón se realizaron pruebas con agua residual de una empresa avícola de Bucaramanga. Se tomaron muestras de agua residual y llevo a cabo la depuración con el sistema de evaporación al vacío, condensando una cantidad de 5 litros y enviándolos al laboratorio SIAMA para para realizarle un análisis físico químico tanto de agua residual como del agua depurada con este proceso.

El figura 62 se muestra el agua residual de la empresa avícola con la cual se alimentó el sistema para realizar las anteriores pruebas de laboratorio y además se muestra el agua concentrada y el agua tratada.

Figura 62. Resultado del tratamiento de aguas residual



- **Análisis de las pruebas del laboratorio**

Se realizó una comparación entre el agua residual de la PETAR\* de la empresa avícola y agua depurada por el sistema de evaporación al vacío. Esta comparación se encuentra en la tabla 19. Remítase los ANEXO G y H para observar los exámenes del laboratorio.

Tabla 19. Comparación del análisis físico-químico de agua residual

---

\* Plata de tratamiento de aguas residuales

<b>variable</b>	<b>Resultados de la efluente PETAR de empresa avícola</b>	<b>Resultados utilizando el prototipo de evaporación al vacío</b>	<b>Unidades</b>
<b>Cloruros</b>	378	2,0	mg Cl/L
<b>Nitrógeno total</b>	266	27,16	mg N/L
<b>Nitrógeno amoniacal</b>	247	4,15	mg N/L
<b>Sulfatos</b>	44,8	<5	mg SO <sub>4</sub> /L
<b>Nitratos</b>	<0,3	<0,3	mg NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> N/L
<b>Nitritos</b>	<0,02	<0,02	mg NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> N/L
<b>Ortofosfatos</b>	0,35	<0,05	mg P/L
<b>Fosforo total</b>	0,47	0,11	mg P/L
<b>Tensoactivos</b>	<0,27	0,56	mg SAAM/L
<b>DQB</b>	1808	226	mg O <sub>2</sub> /L
<b>DBO5</b>	1508	131	mg O <sub>2</sub> /L

<b>Grasa y aceites</b>	44,3	36,3	mg /L
<b>Solidos sedimentables</b>	<0,1	<0,1	mg /L
<b>Solidos totales</b>	812	<30	mg /L
<b>Solidos suspendidos totales</b>	10,8	<10	mg /L

Observando los resultados es fácilmente deducible que el sistema de evaporación al vacío cumple exhaustivamente los límites máximos permitidos en vertimientos al alcantarillado dados por la norma 3930 del 2010 para empresas de avícolas.

## 11. COSTOS

Los costos del sistema de depuración de aguas residuales están relacionados con los costos de fabricación de cada una de las piezas del sistema y de su respectivo montaje, además se debe tener en cuenta el costo de operación que tiene la máquina térmica para depurar 2 kg en una hora. A Continuación se muestra detalladamente cada uno de estos costos.

### 11.1. COSTO DE FABRICACIÓN.

En la tabla 20 se observa el costo fabricación del proyecto

Tabla 20. Costo del proyecto

	Precio (\$)
material en acero inoxidable	79000
material bastidor	90000
soldadura	168000
accesorios (codos, válvulas, miples, topones , vacuómetros, mirillas otros)	385000
bomba de vacío	500000
bomba de recirculación	50000
intercambiador agua-aire	200000
mano de obra	800000
<b>total costos</b>	<b>2'983000</b>

## 11.2. COSTO DE OPERACIÓN.

Para obtener el costo de la operación del sistema en una hora, se tomó el consumo de cada uno de los componentes como se muestra en la tabla 21.

Tabla 21. Amperios y voltaje de componentes del sistema

componentes	Amperios	Voltaje Rms
Resistencia eléctrica	12,8	128
Bomba de circulación del circuito de calentamiento, Pirómetro, fuente de alimentación DC relé.	1	
Bomba de vacío	8,4	
Intercambiador aire-agua (ventilador)	1,95	
Bomba para intercambiador de calor aire-agua	0,39	128

Al tener estos valores se procede a realizar el cálculo para obtener el valor de costo de operación con las siguientes formulas:

$$Potencia\ electrica_w = V * I$$

$$Energia\ electrica = Potencia\ electrica [KW] * tiempo\ de\ uso\ en [h]$$

Y teniendo en cuenta que

$$1 [KWh] = 388,44 pesos$$

En la tabla 22 se observa el cálculo de cada uno de los componentes y su respectivo costo.

Tabla 22. Costo de operación

componentes	tiempo de funcionamiento (h)	potencia eléctrica (W)	potencia eléctrica (kW)	Energía eléctrica KWh	costo pesos
Resistencia eléctrica	0,75	1638,4	1,64	1,23	477,32
Bomba de circulación del circuito de calentamiento, Pirómetro, fuente de relé.	1	128	0,128	0,128	49,72
Bomba de vacío	0,024	1075,2	1,0752	0,026	10,16
Intercambiador aire-agua (ventilador)	1	250	0,25	0,25	97,11
Bomba para intercambiador de calor aire-agua	1	50,1	0,051	0,051	19,44
<b>Total costos de funcionamiento</b>					<b>653,74</b>

Se concluye que el costo de operación de una hora de funcionamiento es de

$$\text{Costo de operación}_{\text{hora}} = 653,74 \text{ [pesos]}$$

Si el sistema funcionara las 24 horas del día (48 litros de condensado) el costo de operación es:

$$\text{Costo de operación}_{\text{dia}} = 653,74 * 24 = 15689,8 \text{ [pesos]}$$

Para un mes de operación (1440 litros de condensado)

$$\text{Costo de operación}_{mes} = 15689,8 * 30 = 470692,8 \text{ [pesos]}$$

### 11.3. COSTO DE OPERACIÓN CON ENERGÍA RESIDUAL.

Los costos de operación del sistema sin tener en cuenta la resistencia eléctrica son los siguientes:

$$\text{Costo de operación}_{hora} = 653,74 - 477,32$$

El costo de operación de una hora de funcionamiento con energía residual es de

$$\text{Costo de operación}_{hora} = 176,42 \text{ [pesos]}$$

Si el sistema funcionara las 24 horas del día (48 litros de condensado) el costo de operación es:

$$\text{Costo de operación}_{dia} = 176,42 * 24 = 4234,1 \text{ [pesos]}$$

Para un mes de operación (1440 litros de condensado)

$$\text{Costo de operación}_{mes} = 3767,83 * 30 = 127022,4 \text{ [pesos]}$$

## 12. CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó un prototipo de evaporador al vacío orientado a tratamiento de las aguas residuales de las empresas avícolas. Este proceso se destaca por que el agua tratada puede ser reutilizada obteniendo un ahorro económico, energético por la utilización de fuentes de energía de baja calidad y reduciendo la generación de vertido industrial.
- La evaporación a baja temperatura no necesita del uso de reactivos químicos logrando que no se contamine a un más el agua a tratar y además reduce enormemente la cantidad de lodo manejado.
- El costo de operación para la depuración de 2 kg/h se relaciona con la energía eléctrica consumida por los elementos (resistencia, bomba de vacío, bombas de circulación, pirómetro) y tomando como referencia el precio de energía a nivel comercial se estimó que el valor para depurar esta cantidad de agua es de 653,74 pesos.
- El costo de operación para la depuración de 2 kg/h cambiado la resistencia eléctrica por energía residual para la evaporación es 176,72 pesos.
- Se demostró por medio de los análisis físico-químicos que se le realizaron al agua depurada en laboratorio, que el sistema de evaporación al vacío cumple

exhaustivamente los límites máximos permitidos en vertimientos al alcantarillado dados por la norma 3930 del 2010 para empresas de avícolas.

- El equipo cuenta con práctico desensamble lo que representa un fácil mantenimiento y de bajo costo, debido a que este consiste en la remoción de concentrado acumulado en las paredes de los tubos de la calandria , que a través del tiempo se convierten un problema para una eficiente transferencia de calor.

### 13. RECOMENDACIONES

- Para obtener una depuración más efectiva se recomienda que el agua residual a tratar tenga un pretratamiento, en el cual se remuevan la mayoría de sólidos de tamaños mayores a 0,5 mm por medio de filtros y rejillas, con el fin de que estos sólidos no obstruyan las tuberías de alimentación y descarga, logrando que transferencia de calor se realice directamente hacia el agua residual y no a los sólidos suspendidos.
- Para la conexión entre el evaporador y el condensador se recomienda que el evaporador este por debajo del condensador, con el fin de que las gotas de agua residual al causar la ebullición no se arrastren hacia el condensador porque al disponerlo de esta manera dichas gotas se devuelvan al evaporador por gravedad. Además el diámetro de la tubería que transporta el vapor debe ser no inferior a 1 pulgada para evitar que las gotas de líquido se arrastren hacia el condensador por el aumento de velocidad.
- Para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema en donde el agua depurada nunca emerja contaminada, se recomienda que el sistema no debe sobrepasar el punto de funcionamiento anteriormente nombrado, debido a que si ocurre esto habrá arrastre de líquido puesto que ocurre una ebullición muy brusca y algunas gotas de líquido se trasladan con el vapor hacia el condensador.
- Para la construcción de este sistema los componentes pueden ser de acero inoxidable o de algún material que no se corroa ya que se van tratar fluidos altamente corrosivos y evitar que el condensado sea contaminado por oxidación

de los materiales. además en el momento de la construcción se deben verificar que los elementos queden perfectamente herméticos para garantizar un funcionamiento óptimo del sistema.

- Después de realizar este prototipo se espera que se desarrollen nuevas investigaciones acerca de los diferentes sistemas de calentamiento como paneles solares humos de combustión o vapores residuales para analizar el comportamiento del evaporador y del equipo de evaporación al vacío ante diferentes fuentes de energía.
- Se espera que estas nuevas investigaciones se enfoquen en mejorar los diferentes componentes en términos transferencia de calor, como materiales y disposición geométrica de los elementos para aumentar la depuración de aguas residuales con volumen de menor tamaño y optimizar el aprovechamiento de la energía suministrada. También se sugiere realizar estudios sobre el comportamiento del sistema con evaporación de múltiples etapas, en la cual se utiliza el vapor de la primera etapa de vaporización para calentar el agua de alimentación de siguientes etapas.
- Además se pretende que se realicen estudios en donde el calor requerido para evaporar en agua residual y el retiro de calor necesario para condensar el vapor de agua sean suministrados por una bomba calorífica de ciclo cerrado.

## BIBLIOGRAFÍA

CASAS-ORIOLO, et al. Tecnología del agua: La evaporación al vacío, una tecnología para la reducción de residuos y reutilización del agua. Barcelona (oct, 2008);p,56

CENGEL. Yunus. Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico. Tercera edición. México: McGraw-Hill Interamericana editores, 2007. (395-581) p. ISBN-13 978-0-07-312930-3.

CHEN P. James. Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists. 12<sup>th</sup> edición. Canadá: 1993.299p. ISBN 0-471-53037-9.

HRS. Heat Exchangers. Planta de evaporación de aguas residuales [en línea]. Madrid (España):21-09-2013[citado 12 de dic, 2013]. Disponible en internet: <http://www.hrs-heatexchangers.com/es/recursos/casos-de-estudio/planta-de-evaporacion-de-aguas-residuales.aspx>

INCROPERA. Frank P. fundamentos de transferencia de calor. Cuarta edición. México: Pearson Education, 1999.

LOPEZ ALMANZA. Erik R. Tratamiento de aguas residuales [en línea].Irapuato (México):2012--[citado 15 de mayo, 2014]. Disponible en internet <http://es.slideshare.net/lobezno81/tratamiento-de-aguas-residuales-11206028>

RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, Antonio, et al. Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales [en línea]. Madrid (España): Circulo de innovación en tecnologías medioambientales y energía, 2006-[citado 15 de dic, 2013]. Disponible en internet

[http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2\\_tratamientos\\_avanzados\\_de\\_aguas\\_residuales\\_industriales.pdfinforme](http://www.madrimasd.org/informacionidi/biblioteca/publicacion/doc/vt/vt2_tratamientos_avanzados_de_aguas_residuales_industriales.pdfinforme)

SHAW, W. A. y BROSDAI, J. D. Estrategias para minimizar el vertido de aguas residuales [en línea].E.E.U.U:[Citado nov 10, 2013]. Disponible e internet

[http://www.veoliawaterst.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17809,Ingeniera-Quimica\\_495\\_Junio-2011.pdf](http://www.veoliawaterst.es/vwst-iberica/ressources/documents/1/17809,Ingeniera-Quimica_495_Junio-2011.pdf)

# ANEXOS

## ANEXO A. CATÁLOGOS

- **Catalogo tubería de cobre**



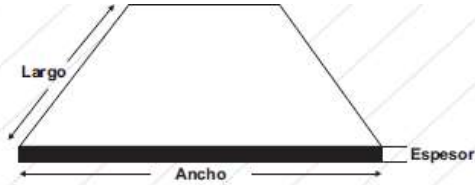
### TIPO ACR

Diámetro Exterior	Espesor de pared		Peso		Presión de trabajo
	pulg.	mm	kg/m	kg/rollo	
1/8	0,030	0,76	0,052	0,792	3.130
3/16	0,030	0,76	0,086	1,311	1.990
1/4	0,030	0,76	0,120	1,829	1.450
5/16	0,032	0,81	0,162	2,469	1.230
3/8	0,032	0,81	0,199	3,033	1.010
1/2	0,032	0,81	0,271	4,130	740
5/8	0,035	0,89	0,373	5,685	640
3/4	0,035	0,89	0,454	6,919	520
7/8	0,042	1,06	0,539	8,214	650
1	0,045	1,14	0,677	10,317	595



Nota: Se designa por su diámetro exterior real, es decir, el tubo de 1/2 pulgada tiene un diámetro exterior real de 1/2 pulgada, y así sucesivamente.

- Catálogo de láminas en acero inoxidable



## LÁMINAS EN ACERO INOXIDABLE

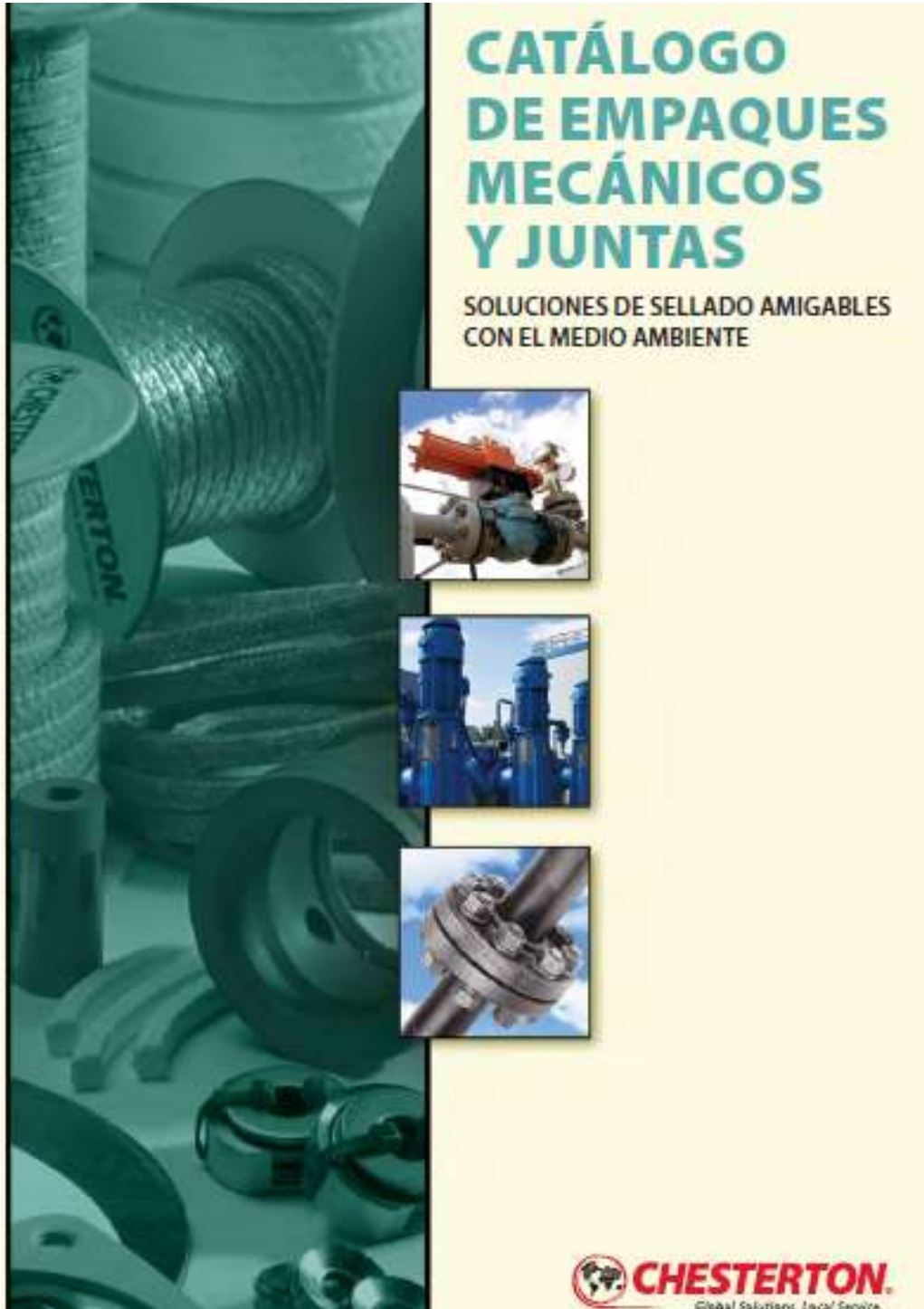
### Especificaciones Técnicas

CALIDADES MAS COMUNES		COMPOSICION QUIMICA								PROPIEDADES MECANICAS				APLICACIONES MAS FRECUENTES		
		L	C	MN	P	S	SI	Cr	Ni	LIMITE ELASTICO	RESISTENCIA A LA TRACCION	% ALARG	DUREZA			
AISI	ACERINOX															
AISI 304	ACX 120	Mín.						18.0	8.0	31Kg/mm2	-	70Kg/mm2	-	60	82	Tubos - Caldería Ind. Alimenticia - Nuclear Menaje.
		Máx.	0.08	2.00	0.04	0.03	0.75	19.0	9.0	-	-	-	-	-	-	
AISI 316	ACX 250	Mín.						16.5	10.5	31Kg/mm2	-	60Kg/mm2	-	57	81	Industria Textil - Alimenticia - Química Petroquímica.
		Máx.	0.07	2.00	0.04	0.03	0.75	18.0	12.0	-	-	-	-	-	-	
AISI 310	ACX 350	Mín.						24.0	19.0	31Kg/mm2	-	67Kg/mm2	-	45	85	Hornos - Chimeneas.
		Máx.	0.07	2.00	0.04	0.03	0.75	26.0	22.0	-	-	-	-	-	-	
AISI 430	ACX 500	Mín.						16.0		-	-	31Kg/mm2	-	31	82	Electrodomesticos Construcción Interior.
		Máx.	0.10	1.00	0.04	0.03	0.75	17.5		-	-	-	-	-	-	

## Dimensiones y Pesos de láminas comerciales

ESPESOR		AISI 304																	
CALIBRE	PULGADA	MILIMETRO	1.0 x 2.0 Mts.		0.91 x 3.05 Mts.		1.2 x 2.44 Mts.		1.52 x 3.05 Mts.		1.0 x 2.0 Mts.		0.91 x 3.05 Mts.		1.2 x 2.44 Mts.		1.52 x 3.05 Mts.		
			M2	Kg.	M2	Kg.	M2	Kg.	M2	Kg.	M2	Kg.	M2	Kg.	M2	Kg.	M2	Kg.	M2
11		3.00	23.10	46.20	64.11	107.09	66.76	107.09	66.06	23.80	47.60	66.06	110.09	70.85	110.34				
	1/8"	3.17	24.41	48.82	67.75	113.16	72.66	113.16	69.80	25.15	50.30	69.80	110.09	74.86	116.59				
		4.00	30.80	61.60	85.49	142.79	91.69	142.79	88.08	31.73	63.47	88.08	110.09	94.46	147.12				
		4.50	34.65	69.30	96.17	160.64	103.15	160.64	99.09	35.70	71.40	99.09	110.09	106.27	165.51				
	3/16"	4.76	36.65	73.30	101.73	169.92	109.11	169.92	104.81	37.76	75.53	104.81	110.09	112.41	175.07				
		5.00	38.50	77.00	106.86	178.49	114.61	178.49	110.09	39.67	79.33	110.09	118.08	118.08	183.89				
		6.00	46.20	92.40	128.23	214.18	137.53	214.18	132.11	47.60	95.20	132.11	141.70	141.70	220.67				
	1/4"	6.35	48.90	97.79	135.71	226.88	145.55	226.88	139.82	50.38	100.75	139.82	149.96	149.96	233.55				
		7.00	53.90	107.80	149.60	249.88	160.45	249.88	154.13	55.53	111.07	154.13	165.31	165.31	257.45				
	5/16"	8.00	61.60	123.20	170.97	285.58	183.37	285.58	176.15	63.47	126.93	176.15	188.93	188.93	284.23				
		9.00	69.30	138.60	192.34	321.27	206.29	321.27	198.17	71.40	142.80	198.17	212.54	212.54	331.01				
	3/8"	9.53	73.38	146.76	203.67	340.19	218.44	340.19	209.84	75.60	151.21	209.84	225.06	225.06	350.50				
		10.00	77.00	154.00	212.71	356.97	229.21	356.97	220.19	79.33	158.67	220.19	236.16	236.16	367.79				
		12.00	92.40	184.80	256.46	428.37	275.06	428.37	264.23	95.20	190.40	264.23	283.39	283.39	441.35				
	1/2"	12.70	97.79	195.58	271.42	453.35	291.10	453.35	279.64	100.75	201.51	279.64	299.92	299.92	467.09				
		15.00	115.50	231.00	320.57	535.46	343.82	535.46	330.28	119.00	238.00	330.28	354.24	354.24	551.68				
	5/8"	15.88	122.28	244.55	338.38	566.87	363.99	566.87	349.66	125.98	251.96	349.66	375.02	375.02	584.05				
	3/4"	19.00	146.30	292.60	405.06	678.25	435.51	678.25	418.36	150.73	301.47	418.36	448.70	448.70	698.80				
		20.00	154.00	308.00	427.43	713.94	458.43	713.94	440.38	158.67	317.33	440.38	472.32	472.32	735.58				
		25.00	192.50	385.00	534.28	892.43	573.03	892.43	550.47	198.33	396.67	550.47	590.40	590.40	919.47				
		40.00	308.00	616.00	854.85	1,427.89	916.85	1,427.89	880.76	317.33	634.67	880.76	944.64	944.64	1,471.16				
		50.00	385.00	770.00	1,068.57	1,784.86	1,146.07	1,784.86	1,100.95	396.67	793.33	1,100.95	1,180.80	1,180.80	1,838.95				
		60.00	462.00	924.00	1,282.28	2,141.83	1,375.28	2,141.83	1,321.14	476.00	952.00	1,321.14	1,416.96	1,416.96	2,206.74				

- Catálogo empaques para bridas



# 100

## Caucho Rojo

Chesterton 100 es una lámina de caucho de butadieno estireno de calidad formulada para permanecer suave y flexible en superficies lisas. 100 es particularmente apto para aire, agua caliente y fría, y vapor saturado.

Pedidos de Productos							
Grosor		Peso $\pm 10\%$		Peso Aproximado por Rollo		Yds. Por Rollo $\pm 10\%$	Número para Hacer un Nuevo Pedido
mm	pulgadas	kg/m <sup>3</sup>	lbs por yd <sup>3</sup>	mm (ancho) x kg	Pulgadas (ancho) x lbs		
1,6	1/16	2,4	4,8	914 x 45	36 x 100	21	010001
2,4	3/32	3,5	7,1	914 x 45	36 x 100	14	010066
3,2	1/8	4,5	9,1	914 x 45	36 x 100	11	010002
4,8	3/16	7,1	14,3	914 x 45	36 x 100	7	010003
6,4	1/4	9,9	20	914 x 45	36 x 100	5	010004



### Datos Técnicos

**Límite de Temperatura:**  
80°C (180°F) máxima –29°C (-20°F) mínima

**Límite de Presión:**  
17 bar g (250 psig)

**Durómetro:**  
70 a 85 Shore A

**Acabado de la Superficie:** Liso

**Color:** Rojo

# 119

## Caucho con Tela Insertada

El Chesterton 119 es una lámina de caucho de estireno y butadieno, con una tela de poliéster insertada de alta resistencia, que le permite adaptarse al servicio hidráulico ligero. La tela se inserta en el interior, protegiendo ambas caras con una cubierta de caucho. Puede utilizarse en agua fría o caliente, vapor a baja presión o amoníaco.

Pedidos de Productos					
Grosor		Peso Aproximado por Rollo		Yds. Por Rollo $\pm 10\%$	Número para Hacer un Nuevo Pedido
mm	pulgadas	mm (ancho) x kg	Pulgadas (ancho) x lbs		
1,5	1/16	914 x 45	36 x 100	23	011901
2,4	3/32	914 x 45	36 x 100	15	011905
3,0	1/8	914 x 45	36 x 100	12	011902
5,0	3/16	914 x 45	36 x 100	8	011903
6,5	1/4	914 x 45	36 x 100	6	011904



### Datos Técnicos

**Límite de Temperatura:**  
80°C (180°F)

**Límite de Presión:**  
10 bar g (150 psig)

**Resistencia a la Tensión:**  
69 bar g (1000 psig) mínimo

**Durómetro:**  
70 a 85 Shore A

**Acabado de la Superficie:** Liso

**Color:** Negro

- Catálogo vacuómetro

- Catálogo tubería en acero inoxidable



**INOXIDABLES**

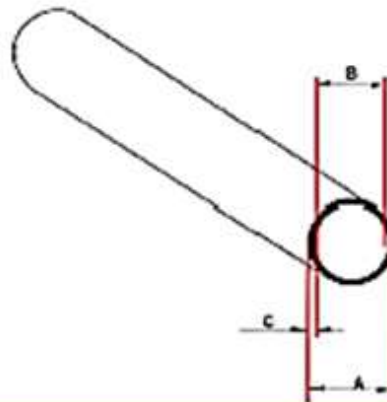
Tubos y Conexiones de Acero Inoxidable

**SERIE INDUSTRIAL SCH. 5S / 10S**

DIMENSIONES SEGÚN ANSI-B 36.19  
ASTM A-269 / A-312

**TUBOS CON COSTURA**

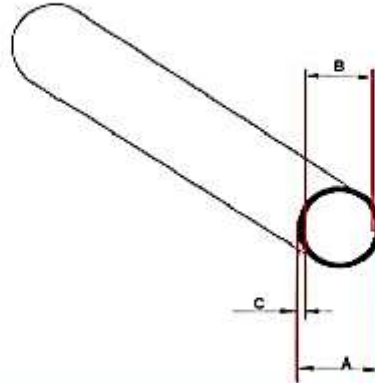
- Acero Inoxidable AISI 304
- Con costura
- Normas ASTM A-269 / A-312
- ANSI-B 36.19
- Acabamiento mate



DN (Inch.)	SCHEDULE 5S				SCHEDULE 10S			
	Ø Ext. A (mm.)	Ø Int. B (mm.)	Espesor Pared C (mm.)	Kg. / Metro	Ø Ext. A (mm.)	Ø Int. B (mm.)	Espesor Pared C (mm.)	Peso Kg. / Metro
1/2"	21.30	18.03	1.65	0.80	21.30	17.12	2.11	1.00
3/4"	26.70	23.37	1.65	1.03	26.70	22.45	2.11	1.28
1"	33.40	30.10	1.65	1.30	33.40	27.86	2.77	2.08
1,1/2"	48.30	44.96	1.65	1.91	48.30	42.72	2.77	3.11
2"	60.30	57.02	1.65	2.40	60.30	54.78	2.77	3.93
3"	88.90	84.68	2.11	4.51	88.90	82.80	3.05	6.44
4"	114.30	110.08	2.11	5.83	114.30	108.20	3.05	8.32

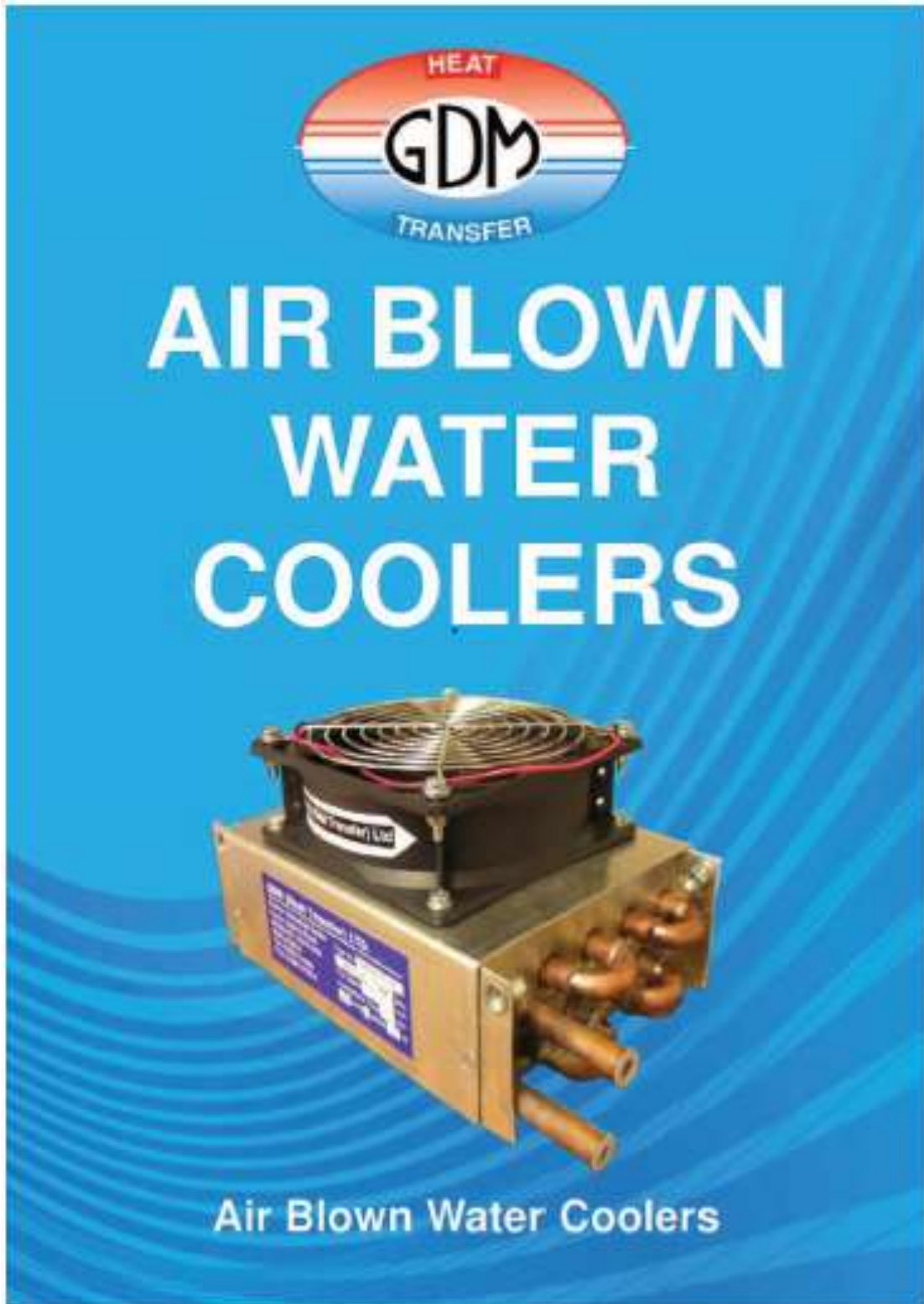
**SERIE SANITARIA**  
Con Pulido Interno y Externo

**TUBOS CON COSTURA**  
- Acero inoxidable AISI 304 X  
- Acero Inoxidable AISI 316  
- Pulido Sanitario Interno y Externo



DN (Inch.)	Ø Ext. A (mm.)	Espesor Pared C (mm.)	Peso Kg. / Metro
1/2"	12.70	1.25	0.357
3/4"	19.00	1.25	0.555
1"	25.40	1.25	0.756
1,1/2"	38.00	1.25	1.280
2"	50.80	1.25	1.570
2,1/2"	63.50	1.5	2.337
3"	76.20	1.5	2.816
4"	101.80	1.5	3.759

- Catálogo intercambiador de calor agua-aire





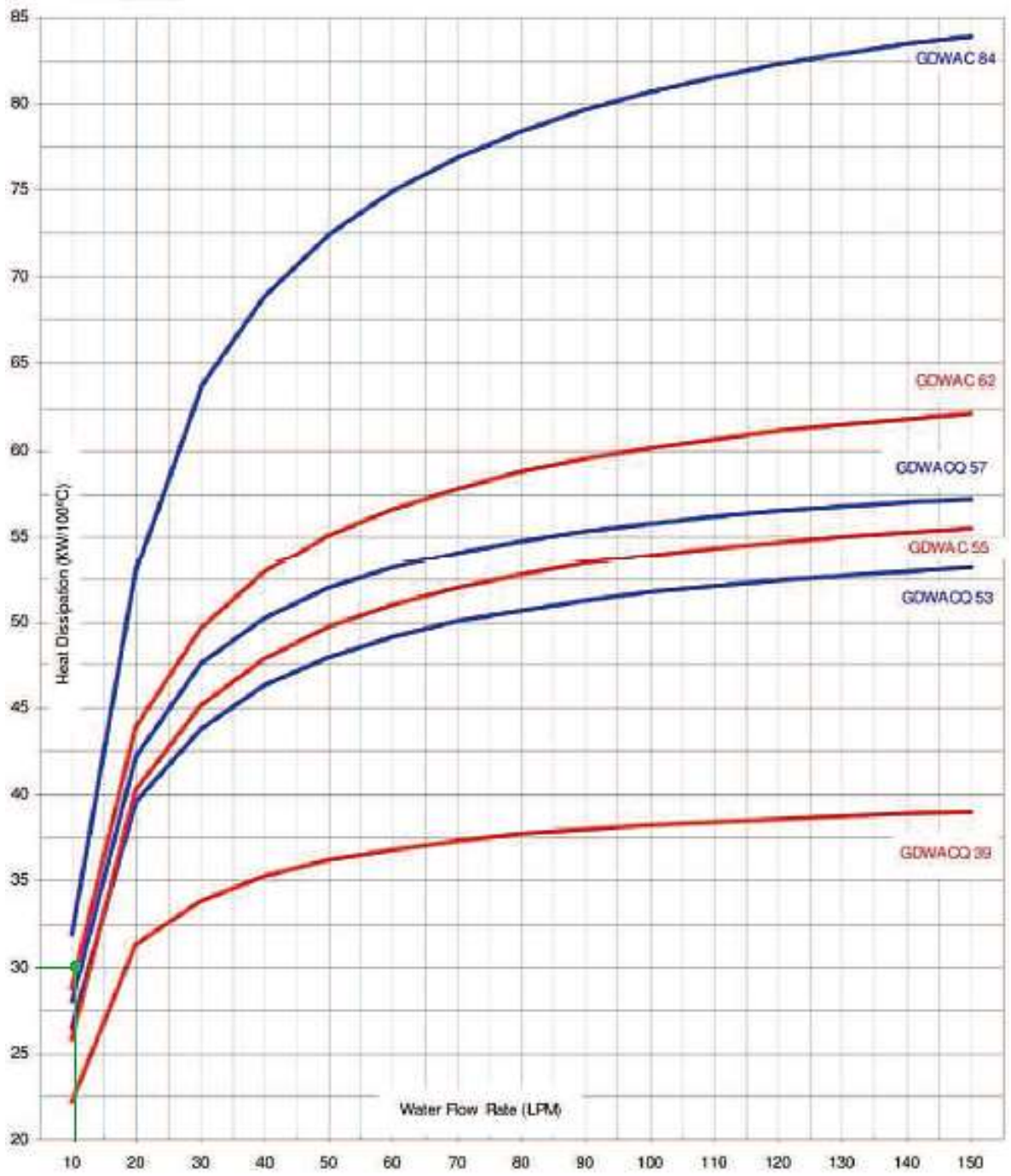
**G.D.M. (Heat Transfer) Limited**

Boston Industrial Estate  
Power Station Road  
RUGELEY  
Staffordshire  
WS15 2HS

Tel: +44 (0)1869 574880  
Fax: +44 (0)1869 575074  
Email: sales@gdmcoolers.co.uk

Website: [www.gdmcoolers.co.uk](http://www.gdmcoolers.co.uk)

Cooler size	Cooling at 100°C ΔT KW	Coil Press Rating	Noise level dBA x 1 MTR	Pipe Sizes (Plain Tube)	Max Water Flow Rate LPM	Fan Power Kw #	AC Fan/Motor Amps			DC Fan/Motor Amps		Approx KG (dry)
							240 V 1 PH 50 HZ	400 V 3 PH 50 HZ	ENCL. IP	12 V	24V	
GDWAC 2	2	15 Bar	45	3/8"	10	0.03	0.15	—	22	—	—	2.5
GDWDC 2	2	15 Bar	45	3/8"	10	0.01	—	—	—	0.52	0.25	2.5
GAWAC 3	3	15 Bar	45	3/8"	10	0.03	0.15	—	22	—	—	2.8
GDWDC 3	3	15 Bar	45	3/8"	10	0.01	—	—	—	0.52	0.25	2.8
GDWAC 7	7	15 Bar	53	3/8"	10	0.03	0.13	—	440	—	—	4.3
GDWDC 7	7	15 Bar	53	3/8"	10	0.02	—	—	—	1.40	0.70	4.3
GDWACQ 11	11	10 Bar	68	15mm	10	0.06	0.26	0.15	44	—	—	6.0
GDWACQ 19	19	10 Bar	65	15mm	15	0.10	0.45	0.26	44	—	—	11.0
GDWAC 22	22	10 Bar	72	15mm	15	0.13	0.60	0.21	44	—	—	11.0
GDWACQ 23	23	10 Bar	65	15mm	15	0.10	0.45	0.26	44	—	—	16.0
GDWAC 27	27	10 Bar	72	15mm	15	0.13	0.60	0.21	44	—	—	16.0
GDWACQ 39	39	10 Bar	60	22mm	150	0.18	—	0.68	55	—	—	40
GDWACQ 53	53	10 Bar	64	22mm	150	0.25	—	0.94	55	—	—	40
GDWAC 55	55	10 Bar	63	22mm	150	0.37	—	1.40	55	—	—	40
GDWACQ 57	57	10 Bar	64	22mm	150	0.25	—	0.94	55	—	—	40
GDWAC 62	62	10 Bar	72	22mm	150	0.55	—	1.90	55	—	—	40
GDWAC 84	84	10 Bar	72	22mm	150	0.55	—	1.90	55	—	—	40



## ANEXO B. CÓDIGO EN EES DE DISEÑO TÉRMICO DE CONDENSADOR

### CONDENSADOR

calculo del  $Q_{\text{conveccion}}$  por el cp que es igual a  $Q_{\text{evaporacion}}$

$$Q_{\text{conveccion}} = \dot{M}_w \cdot C_{p_{\text{agua}}} \cdot (T_{\text{sal}} - T_{\text{en}})$$

$$\dot{M}_w = 0,09 \text{ [kg/s]}$$

$$C_{p_{\text{agua}}} = \mathbf{Cp} ('Water' ; T = T_{\text{prom}} ; P = P_{\text{atm}})$$

$$T_{\text{prom}} = \frac{T_{\text{sal}} + T_{\text{en}}}{2}$$

$$P_{\text{atm}} = 91000 \text{ [Pa]}$$

$$T_{\text{en}} = 27 \text{ [C]}$$

$$T_{\text{sal}} = 30,5 \text{ [C]}$$

calculo del  $Q_{\text{condensacion}}$  por el cambio de fase

$$Q_{\text{conveccion}} = Q_{\text{condensacion}}$$

$$Q_{\text{condensacion}} = \dot{M}_{\text{vap}} \cdot h_{\text{fg}}$$

$$\dot{M}_{\text{vap}} = \frac{2}{3600} \text{ [kg/s]}$$

## PRIMERA ITERACION

se asume un presion de vacio hasta  
que  $h_{fg} = h_{fg, \text{calculado}}$

$$h_f = h(\text{'Water'}; P = P_{\text{vacio}}; x = 0)$$

$$h_g = h(\text{'Water'}; P = P_{\text{vacio}}; x = 1)$$

$$h_{fg, \text{calculado}} = h_g - h_f$$

**TABLA DE ITERACION 1 DE PARA HALLAR PRESION DE VACÍO**

1..20	1 $P_{\text{vacio}}$ [Pa]	2 $h_{fg}$ [J/kg]	3 $h_{fg, \text{calculado}}$
Run 1	10000	2,389E+06	2,392E+06
Run 2	10050	2,389E+06	2,392E+06
Run 3	10100	2,389E+06	2,392E+06
Run 4	10150	2,389E+06	2,391E+06
Run 5	10200	2,389E+06	2,391E+06
Run 6	10250	2,389E+06	2,391E+06
Run 7	10300	2,389E+06	2,391E+06
Run 8	10350	2,389E+06	2,390E+06
Run 9	10400	2,389E+06	2,390E+06
Run 10	10450	2,389E+06	2,390E+06
Run 11	10500	2,389E+06	2,390E+06
Run 12	10550	2,389E+06	2,389E+06
Run 13	10600	2,389E+06	2,389E+06
Run 14	10650	2,389E+06	2,389E+06
Run 15	10700	2,389E+06	2,389E+06
Run 16	10750	2,389E+06	2,389E+06
Run 17	10800	2,389E+06	2,388E+06
Run 18	10850	2,389E+06	2,388E+06
Run 19	10900	2,389E+06	2,388E+06
Run 20	10950	2,389E+06	2,388E+06

realizando la iteración se llegó al valor aproximado de

$$P_{\text{vacío}} = 10700 \text{ [Pa]}$$

se calculó la temperatura de saturación a  $P_{\text{vacío}}$

$$T_{\text{sat}} = T_{\text{sat}} (\text{'Water'} ; P = P_{\text{vacío}})$$

### CONVECCIÓN INTERNA FORZADA

$$RE_1 = \frac{V_{\text{tubo}} \cdot D_{\text{tin}} \cdot \rho}{\mu}$$

$$\dot{M}_w = \rho \cdot \text{Vel} \cdot A_{\text{trans}}$$

$$V_{\text{tubo}} = \frac{\text{Vel}}{N_{\text{tubos}}}$$

$$N_{\text{tubos}} = 18$$

$$A_{\text{trans}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{tin}}^2$$

$$D_{\text{tin}} = D_{\text{tinex}} - 2 \cdot \text{espesor}$$

$$\text{espesor} = \frac{0,89}{1000}$$

$$D_{\text{tinex}} = 5 / 8 \cdot 0,0254$$

$$T_1 = 27 \text{ [C]}$$

$$\rho = \rho(\text{'Water'}; T = T_{\text{prom}}; P = P_{\text{atm}})$$

$$\mu = \mathbf{Visc}(\text{'Water'}; T = T_{\text{prom}}; P = P_{\text{atm}})$$

### FLUJO TUBULENTO TUBO LISO

$$f = (0,79 \cdot \ln(RE_1) - 1,64)^{-2} \text{ factor de fricción}$$

$$Pr_1 = \mathbf{Pr}(\text{'Water'}; T = T_{\text{prom}}; P = P_{\text{atm}}) \text{ prant del agua}$$

$$\text{Nusselt} = 0,125 \cdot f \cdot RE_1 \cdot Pr_1^{(1/3)} \text{ cálculo del nuselt}$$

$$k_1 = \mathbf{k}(\text{'Water'}; T = T_{\text{prom}}; P = P_{\text{atm}}) \text{ conductividad termica del agua}$$

$$\text{Nusselt} = \frac{h_{\text{confor}} \cdot D_{\text{tin}}}{k_1}$$

### Cálculo de la temperatura superficial

$$Q_{\text{conveccion}} = h_{\text{confor}} \cdot A_{\text{int}} \cdot (T_{\text{superficial}} - T_{\text{prom}})$$

## Cálculo del h por condensación

$$h_{\text{condensacion}} = 0,943 \cdot \left[ \frac{d}{e} \right]^{(1/4)}$$

$$d = g \cdot \rho_l \cdot [\rho_l - \rho_v] \cdot h_{\text{fgc}} \cdot k_l^3$$

$$e = \mu_l \cdot (T_{\text{sat}} - T_{\text{superficial}}) \cdot L_{\text{tubo}}$$

$$Pr_l = \mathbf{Pr} ('Water'; T = T_2; P = P_{\text{vacio}})$$

$$T_2 = \frac{T_{\text{superficial}} + T_{\text{sat}}}{2}$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s]}$$

$$\rho_v = 0,0512$$

$$\rho_l = \rho ('Water'; T = T_2; x = 0)$$

$$\mu_l = \mathbf{Visc} ('Water'; T = T_2; x = 0)$$

$$k_l = \mathbf{k} ('Water'; T = T_2; x = 0)$$

$$h_{\text{fgc}} = h_{\text{fg}} + 0,68 \cdot C_{p_{\text{agua}}} \cdot (T_{\text{sat}} - T_{\text{superficial}})$$

### Cálculo del del U por las resistencias

$$U = \frac{1}{A_s \cdot R_{total}}$$

$$R_{total} = R_{con,int} + R_{condu} + R_{con,ex}$$

$$R_{con,int} = \frac{1}{h_{confor} \cdot A_{int}}$$

$$R_{con,ex} = \frac{1}{h_{condensacion} \cdot A_{ext}}$$

$$A_{int} = N_{tubos} \cdot \pi \cdot D_{tin} \cdot L_{tubo}$$

$$A_{ext} = N_{tubos} \cdot \pi \cdot L_{tubo} \cdot D_{tinex}$$

$$R_{condu} = \frac{\ln \left[ \frac{D_{tinex}}{D_{tin}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot K_{cobre} \cdot L_{tubo}}$$

$$A_s = A_{int}$$

$$K_{cobre} = 410 \text{ tabla A-3 pag 844 cengel}$$

$$A_{scm} = A_s \cdot 100^2$$

## SEGUNDA ITERACION

se supone un  $U_{\text{asumido}}$  hasta  
que  $U_{\text{asumido}}=U$  entonces se obtiene el  
area de transferencia

Cálculo de del Area de tranferencia de calor por medio de la Lmtd

$$A_s = \frac{Q_{\text{condensacion}}}{U_{\text{asumido}} \cdot Lmtd}$$

$$a = T_{\text{sat}} - T_{\text{en}} - (T_{\text{sat}} - T_{\text{sal}})$$

$$b = \ln \left[ \frac{T_{\text{sat}} - T_{\text{en}}}{T_{\text{sat}} - T_{\text{sal}}} \right]$$

$$Lmtd = \frac{a}{b}$$

realizando la iteracion se llego al valor aproximado de

$$U_{\text{asumido}} = 448,1$$

**TABLA DE ITERACION 2 PARA HALLAR ‘U’ DEL CONDENSADOR**

ITERACION PRESION	ITERACION U	
▶ 1..20	1 U <sub>asumido</sub> [w/m <sup>2</sup> *C]	2 U [w/m <sup>2</sup> *C]
Run 1	447	447,9
Run 2	447,1	448
Run 3	447,2	448
Run 4	447,3	448
Run 5	447,4	448
Run 6	447,5	448
Run 7	447,6	448
Run 8	447,7	448
Run 9	447,8	448,1
Run 10	447,9	448,1
Run 11	448	448,1
Run 12	448,1	448,1
Run 13	448,2	448,1
Run 14	448,3	448,1
Run 15	448,4	448,2
Run 16	448,5	448,2
Run 17	448,6	448,2
Run 18	448,7	448,2
Run 19	448,8	448,2
Run 20	448,9	448,2

## RESULTADOS CONDENSADOR

$a = 3,526$   
 $A_{scm} = 1619 \text{ [cm}^2\text{]}$   
 $d = 5,648E+12$   
 $\text{espesor} = 0,00089$   
 $h_{confor} = 468,7 \text{ [W/m}^2\text{*C]}$   
 $h_{fg, calculado} = 2,389E+06$   
 $k_f = 0,6265 \text{ [W/m*C]}$   
 $\mu_l = 0,0005789 \text{ [kg/m*s]}$   
 $N_{tubos} = 18$   
 $P_{vacio} = 10700 \text{ [Pa]}$   
 $\rho = 996 \text{ [kg/m}^3\text{]}$   
 $R_{con,ex} = 0,0003784$   
 $T2 = 46,69 \text{ [C]}$   
 $T_{sat} = 47,12 \text{ [C]}$   
 $Vel = 0,5791 \text{ [m/s]}$

$A_{ext} = 0,1823 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $A_{trans} = 0,000156 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $D_{tin} = 0,0141$   
 $f = 0,08928$   
 $h_f = 197281 \text{ [J/kg]}$   
 $h_g = 2,586E+06 \text{ [J/kg]}$   
 $L_{mtd} = 18,3$   
 $\dot{M}_{vap} = 0,0005556 \text{ [kg/s]}$   
 $Pr_1 = 5,702$   
 $Q_{condensacion} = 1327 \text{ [W]}$   
 $\rho_l = 989,4 \text{ [kg/m}^3\text{]}$   
 $R_{con,int} = 0,01318$   
 $T_{en} = 27 \text{ [C]}$   
 $T_{superficial} = 46,26 \text{ [C]}$   
 $V_{tubo} = 0,03217 \text{ [m/s]}$

$A_{int} = 0,1619 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $b = 0,1927$   
 $D_{tinex} = 0,01588$   
 $g = 9,81 \text{ [m/s]}$   
 $h_{fg} = 2,389E+06 \text{ [J/kg]}$   
 $k_1 = 0,601 \text{ [W/m*C]}$   
 $L_{tubo} = 0,2031 \text{ [m]}$   
 $\dot{M}_w = 0,09 \text{ [kg/s]}$   
 $Pr_1 = 3,864$   
 $Q_{conveccion} = 1327 \text{ [W]}$   
 $\rho_v = 0,0512 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$   
 $R_{total} = 0,01379$   
 $T_{prom} = 28,76 \text{ [C]}$   
 $U = 448,1 \text{ [w/m}^2 \text{*C]}$

$A_s = 0,1619 \text{ [m}^2\text{]}$   
 $Cp_{agua} = 4183 \text{ [J/kg-K]}$   
 $e = 0,0001012$   
 $h_{condensacion} = 14493 \text{ [W/m}^2\text{*C]}$   
 $h_{fgc} = 2,392E+06 \text{ [J/kg]}$   
 $K_{cobre} = 410 \text{ [W/m*C]}$   
 $\mu = 0,0008192 \text{ [kg/m*s]}$   
 $Nusselt = 10,99$   
 $P_{atm} = 91000 \text{ [Pa]}$   
 $RE_1 = 551,4$   
 $R_{condu} = 0,0002273$   
 $T1 = 27 \text{ [C]}$   
 $T_{sal} = 30,5 \text{ [C]}$   
 $U_{asumido} = 448,1 \text{ [w/m}^2 \text{*C]}$

## ANEXO C. CÓDIGO EN EES DE DISEÑO TÉRMICO DE EVAPORADOR

### EVAPORADOR

presion de vacio calculada para los requerimientos del condensador

$$P_{\text{vacio}} = 10700$$

Cálculo del  $Q_{\text{evaporación}}$  por el cambio de fase

$$Q_{\text{evaporacion}} = \dot{M}_{\text{vap}} \cdot h_{fg}$$

$$\dot{M}_{\text{vap}} = \frac{2}{3600} \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad \text{Taza flujo que se desea evaporar}$$

$$h_f = h(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; x = 0)$$

$$h_g = h(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; x = 1)$$

$$h_{fg} = h_g - h_f$$

$$T_{\text{sat}} = T(\text{'Water'}; P = P_{\text{vacio}}; x = 1)$$

$$P_{\text{atm}} = 91000$$

Cálculo del  $Q_{\text{conveccion}}$  por el cp que es igual a  $Q_{\text{evaporación}}$

$$Q_{\text{conveccion}} = \dot{M}_w \cdot C_{p_{\text{agua}}} \cdot (T_{\text{en}} - T_{\text{sal}})$$

$$T_{\text{en}} = 52 \quad [\text{C}]$$

$$Q_{\text{conveccion}} = Q_{\text{evaporacion}}$$

$$C_{p_{\text{agua}}} = \mathbf{Cp}(\text{'Water'}; T = T1; P = P_{\text{atm}})$$

$$\dot{M}_w = 0,12 \quad [\text{kg/s}] \quad \text{bomba de 1,95 Gpm}$$

$$T1 = 52 \quad [\text{C}]$$

## CALCULO DEL REINOLD CONVECCION EXTERNA FORZADA BANCO DE TUBOS

$S_T = 0,03$  este calculo se obtuvo de la distribucion de los tubos en la calandria

$$V_{\max} = \left[ \frac{S_T}{S_T - D_{\text{ext}}} \right] \cdot \text{Vel}$$

$$D_{\text{ext}} = 0,0254$$

$$\dot{M}_w = \rho \cdot \text{Vel} \cdot A_{\text{trans}}$$

$$A_{\text{trans}} = 6 \cdot S_T \cdot L_{\text{tubo}}$$

$$RE_1 = \frac{V_{\max} \cdot D_{\text{ext}} \cdot \rho}{\mu}$$

$$T_{1\text{prom}} = \frac{T_{\text{en}} + T_{\text{sal}}}{2}$$

$$\rho = \rho(\text{'Water'}; T=T_{1\text{prom}}; P=p_{\text{atm}})$$

$$\mu = \mathbf{Visc}(\text{'Water'}; T=T_{1\text{prom}}; P=p_{\text{atm}})$$

$$\text{Nusselt} = 0,27 \cdot RE_1^{0,63} \cdot pr_1^{0,36} \cdot \left[ \frac{pr_1}{pr_S} \right]^{0,25} \quad \text{para Reynold entre } 1000 - 2 \cdot 10^5$$

$$pr_1 = \mathbf{Pr}(\text{'Water'}; T=T_{1\text{prom}}; P=p_{\text{atm}}) \quad \text{prant del agua}$$

$$pr_S = \mathbf{Pr}(\text{'Water'}; T=T_{\text{sal}}; P=p_{\text{atm}}) \quad \text{prant del agua}$$

$$\text{Nusselt} = \frac{h_{\text{confor}} \cdot D_{\text{ext}}}{k_w}$$

$$k_w = \mathbf{k}(\text{'Water'}; T=T_{1\text{prom}}; P=p_{\text{atm}}) \quad \text{conductividad termica del agua}$$

$$D_{\text{int}} = 1 \cdot 0,0254 - 2 \cdot \frac{1,25}{1000}$$

## CALCULO EBULLICION

$$Q_{\text{EBULLICION}} = Q_{\text{evaporacion}}$$

$$Q_{\text{EBULLICION}} = h_{\text{ebullicion}} \cdot A_{\text{evaporador}} \cdot (T_{\text{superficial}} - T_{\text{sat}})$$

$$N_{\text{tubos}} = 17$$

$$A_{\text{evaporador}} = N_{\text{tubos}} \cdot \pi \cdot D_{\text{int}} \cdot L_{\text{tubo}}$$

$$Q_{\text{EBULLICION}} = \mu_l \cdot h_{\text{fg}} \cdot \gamma^{(1/2)} \cdot v_b^3 \cdot A_{\text{evaporador}}$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

variable para simplificar la ecuación del  $Q_{\text{EBULLICION}}$

$$\gamma = \frac{g \cdot [\rho_l - \rho_v]}{\sigma}$$

variable para simplificar la ecuación del  $Q_{\text{EBULLICION}}$

$$v_b = \frac{C_{p_l} \cdot (T_{\text{superficial}} - T_{\text{sat}})}{C_{\text{sf}} \cdot h_{\text{fg}} \cdot \rho_l^n}$$

$$\rho_v = 0,0512 \text{ tomado cengel tabla A-9 pag 854}$$

$$\rho_l = \rho(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; P = P_{\text{vacio}})$$

$$\mu_l = \mathbf{Visc}(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; P = P_{\text{vacio}})$$

$$k_l = \mathbf{k}(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; P = P_{\text{vacio}})$$

$$\rho_l = \mathbf{Pr}(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; P = P_{\text{vacio}})$$

$$C_{p_l} = \mathbf{Cp}(\text{'Water'}; T = T_{\text{sat}}; P = P_{\text{vacio}})$$

$$C_{\text{sf}} = 0,0058 \text{ sacado tabla 10-3 cengel pag 570}$$

$$n = 1$$

$$\sigma = 0,0662 \text{ sacadp tabla 10-1 cengel pag 568}$$

$$\Delta T = T_{\text{superficial}} - T_{\text{sat}} \text{ delta}_T \text{ es calcula con el fin de}$$

saber que clase de ebullicion es :

ebullicion de pelicula o en estanque si es mavor de 30 es de pelicula

calculo de del Area de tranferencia de calor por medio de la Lmtd

$$\text{variable}_1 = \frac{Q_{\text{evaporacion}}}{Lmtd}$$

$$\text{variable}_1 = U_{\text{asumido}} \cdot A_S \quad \text{variable ficticia que facilita la intrudccion de las variables U y A}$$

### ITERACION

se supone un  $U_{\text{asumido}}$  hasta que  $U_{\text{asumido}} = U$  entonces se optiene el area de transferencia

$$a = T_{\text{en}} - T_{\text{sat}} - (T_{\text{sal}} - T_{\text{sat}})$$

$$b = \ln \left[ \frac{T_{\text{en}} - T_{\text{sat}}}{T_{\text{sal}} - T_{\text{sat}}} \right]$$

$$Lmtd = \frac{a}{b}$$

calculo del del U por las resistencias

$$\text{variable}_2 = U \cdot A_S \quad \text{variable ficticia que facilita la}$$

intruducción de las variables U y A

$$\text{variable}_2 = \frac{1}{R_{\text{total}}}$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_{\text{confor}} \cdot A_{\text{ext}}} + R_{\text{condu}} + \frac{1}{h_{\text{ebullicion}} \cdot A_{\text{int}}}$$

$$A_{\text{int}} = N_{\text{tubos}} \cdot \pi \cdot D_{\text{int}} \cdot L_{\text{tubo}}$$

$$A_{\text{ext}} = N_{\text{tubos}} \cdot \pi \cdot L_{\text{tubo}} \cdot D_{\text{ext}}$$

$$R_{\text{condu}} = \frac{\ln \left[ \frac{D_{\text{ext}}}{D_{\text{int}}} \right]}{2 \cdot \pi \cdot K_{\text{inox}} \cdot L_{\text{tubo}} \cdot N_{\text{tubos}}}$$

$$A_S = A_{\text{int}}$$

tabla A-3 pag 844 cengel

$$K_{\text{inox}} = 16$$

$$U_{\text{asumido}} = 1390$$

**TABLA DE ITERACION PARA HALLAR "U" DEL EVAPORADOR**

▶ 1..20	<sup>1</sup> U <sub>asumido</sub> [W/m <sup>2</sup> °C]	<sup>2</sup> U [W/m <sup>2</sup> °C]
Run 1	1350	1367
Run 2	1360	1373
Run 3	1370	1379
Run 4	1380	1385
Run 5	1390	1390
Run 6	1400	1396
Run 7	1410	1402
Run 8	1420	1408
Run 9	1430	1414
Run 10	1440	1420
Run 11	1450	1426
Run 12	1460	1432
Run 13	1470	1437
Run 14	1480	1443
Run 15	1490	1449
Run 16	1500	1455
Run 17	1510	1460
Run 18	1520	1466
Run 19	1530	1472
Run 20	1540	1477

## RESULTADOS EVAPORADOR

$$a = 2,645$$

$$A_{\text{trans}} = 0,03522 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$\Delta_T = 2,637 \text{ [C]}$$

$$h_{\text{ebullicion}} = 1786 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C]}$$

$$k_l = 0,627 \text{ [W/m} \cdot \text{C]}$$

$$\mu_l = 0,0005746 \text{ [Kg/m-s]}$$

$$N_{\text{tubos}} = 17$$

$$P_{\text{vacio}} = 10700$$

$$\rho = 987,7 \text{ [Kg/ m}^3\text{]}$$

$$\sigma = 0,0662 \text{ [N/m]}$$

$$T_{\text{sat}} = 49,36 \text{ [C]}$$

$$\text{variable}_1 = 391,8$$

$$Y = 146589$$

$$A_{\text{evaporador}} = 0,2818 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$b = 0,7808$$

$$D_{\text{ext}} = 0,0254$$

$$h_f = 197281 \text{ [J/kg]}$$

$$k_w = 0,6312 \text{ [W/m-C]}$$

$$\dot{M}_{\text{vap}} = 0,0005556 \text{ [kg/s]}$$

$$pr_1 = 3,583$$

$$Q_{\text{conveccion}} = 1327 \text{ [W]}$$

$$\rho_l = 989,3 \text{ [Kg/ m}^3\text{]}$$

$$S_T = 0,03$$

$$T_{\text{sat}} = 47,12 \text{ [C]}$$

$$\text{variable}_2 = 391,9$$

$$A_{\text{ext}} = 0,3126 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Cp_{\text{agua}} = 4182 \text{ [J/Kg} \cdot \text{C]}$$

$$D_{\text{int}} = 0,0229$$

$$h_{fg} = 2,389\text{E}+06 \text{ [J/Kg]}$$

$$L_{\text{mtd}} = 3,387$$

$$\dot{M}_w = 0,12 \text{ [kg/s]}$$

$$pr_l = 3,832$$

$$Q_{\text{EBULLICION}} = 1327 \text{ [W]}$$

$$\rho_v = 0,0512 \text{ [Kg/ m}^3\text{]}$$

$$T1 = 52 \text{ [C]}$$

$$T_{\text{superficial}} = 49,76 \text{ [C]}$$

$$vb = 0,2077$$

$$A_{\text{int}} = 0,2818 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$Cp_l = 4182 \text{ [J/Kg} \cdot \text{C]}$$

$$g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$h_g = 2,586\text{E}+06 \text{ [J/kg]}$$

$$L_{\text{tubo}} = 0,2305 \text{ [m]}$$

$$n = 1$$

$$pr_s = 3,672$$

$$Q_{\text{evaporacion}} = 1327 \text{ [W]}$$

$$R_{\text{condu}} = 0,0002631$$

$$T1_{\text{prom}} = 50,68 \text{ [C]}$$

$$U = 1390 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C]}$$

$$\text{Vel} = 0,00345 \text{ [m/s]}$$

$$A_s = 0,2818 \text{ [m}^2\text{]}$$

$$C_{sf} = 0,0058$$

$$h_{\text{confor}} = 10607 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C]}$$

$$K_{\text{inox}} = 16 \text{ [W/m} \cdot \text{C]}$$

$$\mu = 0,0005409 \text{ [Kg/m-s]}$$

$$\text{Nusselt} = 426,8$$

$$P_{\text{atm}} = 91000 \text{ [Pa]}$$

$$RE_1 = 58218$$

$$R_{\text{total}} = 0,002552$$

$$T_{\text{en}} = 52 \text{ [C]}$$

$$U_{\text{asumido}} = 1390 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{C]}$$

$$V_{\text{max}} = 1,255 \text{ [m/s]}$$

## ANEXO D. CALCULO DEL VOLUMEN INTERIOR SUBSISTEMA EVAPORADOR- CONDENSADOR

volumen interior del evaporador

datos

$$D_{\text{evap}} = 9 \cdot 2,54$$

$$r = \frac{D_{\text{evap}}}{2}$$

$$h_{\text{evap}} = 25$$

$$N_{\text{t;evap}} = 17$$

$$L = 5$$

$$D_{\text{tuboseva}} = 2,54$$

$$V_{\text{cono;evap}} = 1 / 3 \cdot r^2 \cdot h_{\text{evap}}$$

$$V_{\text{cilindro;evap}} = \frac{\pi}{2} \cdot r^2 \cdot h_{\text{evap}}$$

$$V_{\text{tubos;evap}} = N_{\text{t;evap}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{tuboseva}}^2$$

$$V_{\text{tapa;evap}} = \frac{\pi}{2} \cdot r^2 \cdot L$$

$$V_{\text{total;evaporador}} = V_{\text{cono;evap}} + V_{\text{cilindro;evap}} - V_{\text{tubos;evap}} + V_{\text{tapa;evap}}$$

volumen interior del condensador

$$D_{\text{conde}} = 16$$

$$r_{\text{conde}} = \frac{D_{\text{conde}}}{2}$$

$$h_{\text{conde}} = 22$$

$$N_{t,\text{conde}} = 18$$

$$D_{\text{tuboscon}} = 5 / 8 \cdot 2,54$$

$$V_{\text{esfera;conde}} = 4 / 3 \cdot r_{\text{conde}}^3 \cdot \pi$$

$$V_{\text{cilindrocon}} = \frac{\pi}{2} \cdot r_{\text{conde}}^2 \cdot h_{\text{conde}}$$

$$V_{\text{tubosconde}} = N_{t,\text{conde}} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{tuboscon}}^2$$

$$V_{\text{total;condensador}} = V_{\text{esfera;conde}} + V_{\text{cilindrocon}} - V_{\text{tubosconde}}$$

volumen interior conexion evaporador- condensador

$$D_{\text{conex}} = 2 \cdot 2,54$$

$$L_{\text{conexion}} = 50$$

$$V_{\text{conexion}} = \frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{conex}}^2 \cdot L_{\text{conexion}}$$

## VOLUMEN TOTAL A RETIRAR

$$V_{\text{retirar}} = V_{\text{conexion}} + V_{\text{total;condensador}} + V_{\text{total;evaporador}}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{bomba,min}} = \frac{V_{\text{retirar}}}{42475,27} \quad \text{el valor } 42475,27 \text{ son cm}^3/\text{min- (8 cfm) de la bomba seleccionada}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{bomba,seg}} = \text{Tiempo}_{\text{bomba,min}} \cdot 60$$

## Resultados

$$D_{\text{conde}} = 16 \text{ [cm]}$$

$$D_{\text{evap}} = 22,86 \text{ [cm]}$$

$$D_{\text{tuboseva}} = 2,54 \text{ [cm]}$$

$$h_{\text{evap}} = 25$$

$$L_{\text{conexion}} = 50$$

$$N_{\text{t,evap}} = 17$$

$$r_{\text{conde}} = 8 \text{ [cm]}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{bomba,seg}} = 3,309 \text{ [s]}$$

$$V_{\text{cilindro,evap}} = 5130$$

$$v_{\text{cono,evap}} = 1089$$

$$V_{\text{retirar}} = 12493 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_{\text{total,condensador}} = 4321 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_{\text{tubosconde}} = 35,63 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$D_{\text{conex}} = 5,08$$

$$D_{\text{tuboscon}} = 1,588 \text{ [cm]}$$

$$h_{\text{conde}} = 22 \text{ [cm]}$$

$$L = 5 \text{ [cm]}$$

$$N_{\text{t,conde}} = 18$$

$$r = 11,43 \text{ [cm]}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{bomba,min}} = 0,05515 \text{ [min]}$$

$$V_{\text{cilindrocon}} = 2212 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$V_{\text{conexion}} = 1013 \text{ [cm}^3\text{]}$$

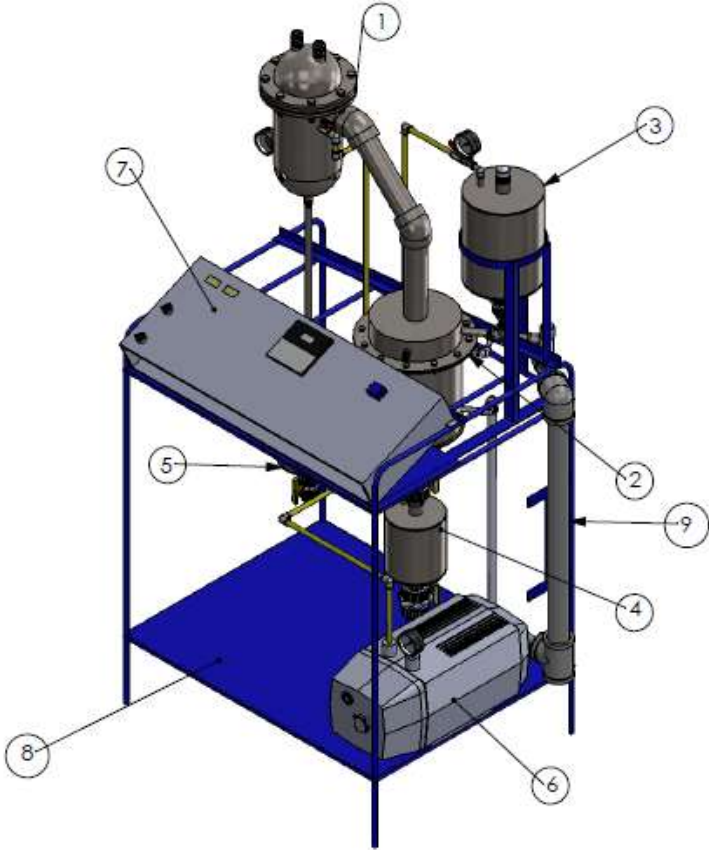
$$v_{\text{esfera,conde}} = 2145$$

$$V_{\text{tapa,evap}} = 1026$$


$$V_{\text{total,evaporador}} = 7159 \text{ [cm}^3\text{]}$$

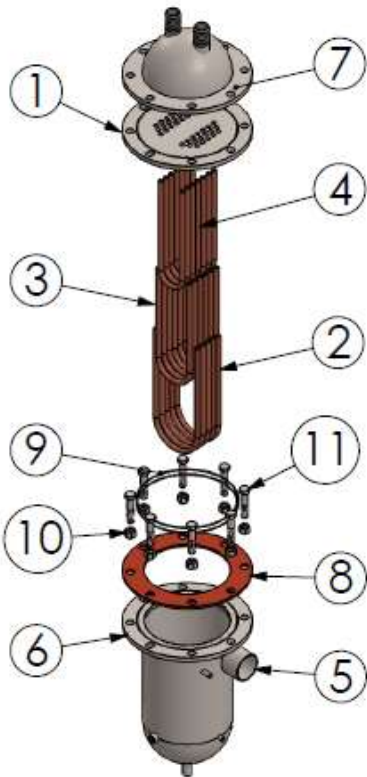
$$V_{\text{tubos,evap}} = 86,14$$

## ANEXO E. PLANOS DEL SISTEMA



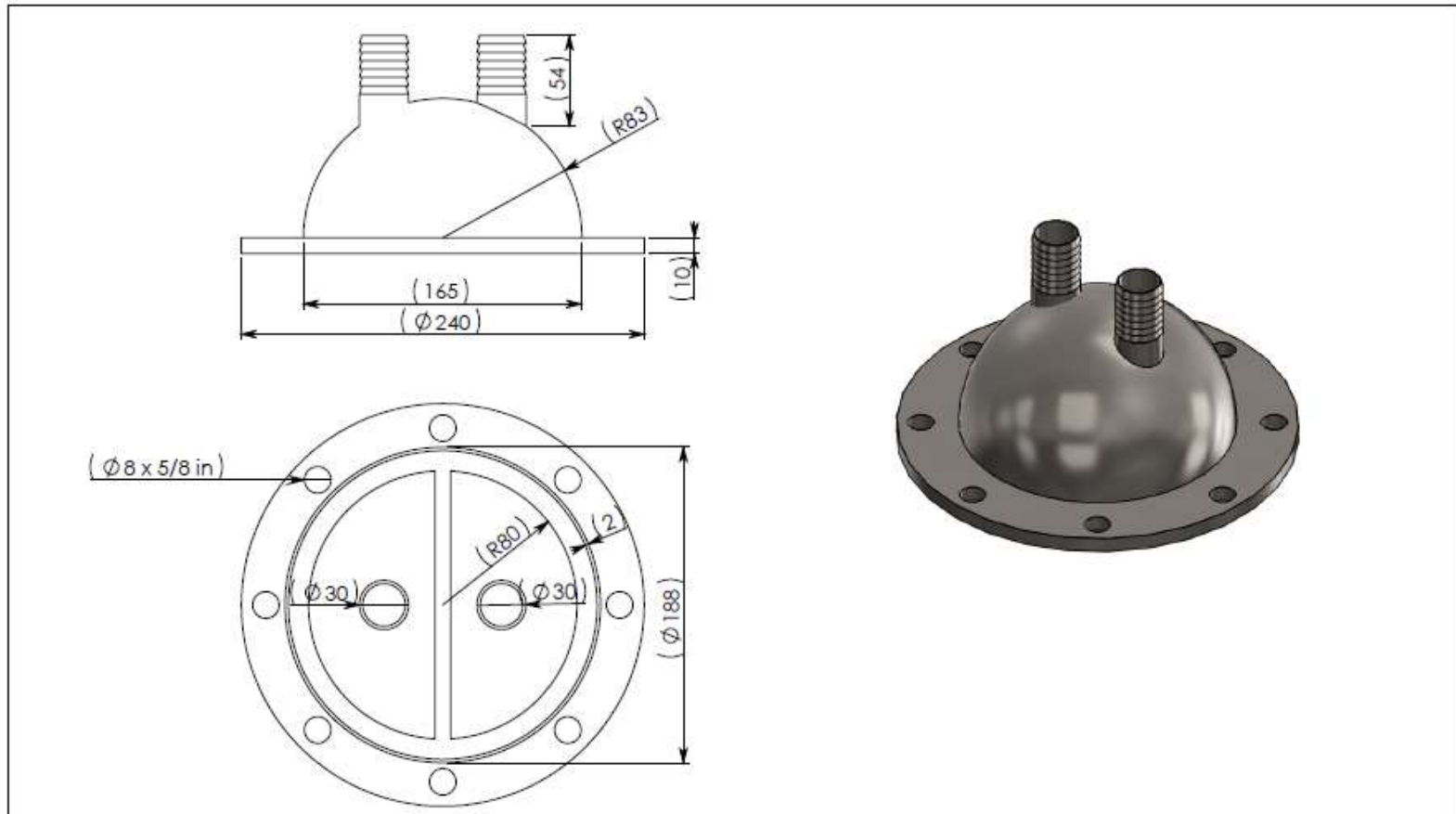
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA
1	CONDENSADOR
2	EVAPORADOR
3	TANQUE DE ALIMENTACION
4	TANQUE CONCENTRADO
5	TANQUE CONDENSADO
6	BOMBA DE VACIO
7	TABLERO DE CONTROL
8	BASTIDOR
9	CASCO RESISTENCIA ELECTRICA

	<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	<b>SISTEMA DE EVAPORACION AL VACIO</b>	<b>MATERIAL:</b> Acero Inoxidable
ESC: 1: 13	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERANCIAS Lineal:0.1mm Angular:0.1°
		Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval	01-00-00

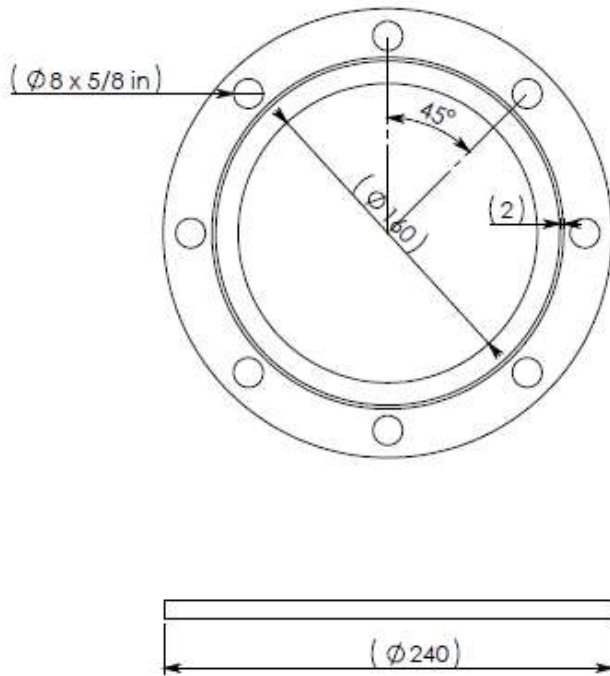



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BRIDA TUBOS	ESPESOR 3/16"	1
2	TUBOS EXTERNOS	TUBOS DE COBRE DE 5/8 "	5
3	TUBOS INTERMEDIOS	TUBOS DE COBRE DE 5/8 "	6
4	TUBOS INTERNOS	TUBOS DE COBRE DE 5/8 "	7
5	CASCO CONDENSADOR	ESPESOR 1/8"	1
6	BRIDA CASCO	ESPESOR 3/16	1
7	BRIDA TAPA SUPERIOR	ESPESOR 3/16"	1
8	EMPAQUE BRIDA CASCO	CAUCHO ROJO	1
9	EMPAQUE RANURAS	CAUCHO	2
10	TORNILLO BRIDA CASCO	TORNILLO DE 5/8"	8
11	TUERCA TORNILLO CASCO	TUERCA DE 5/8"	8

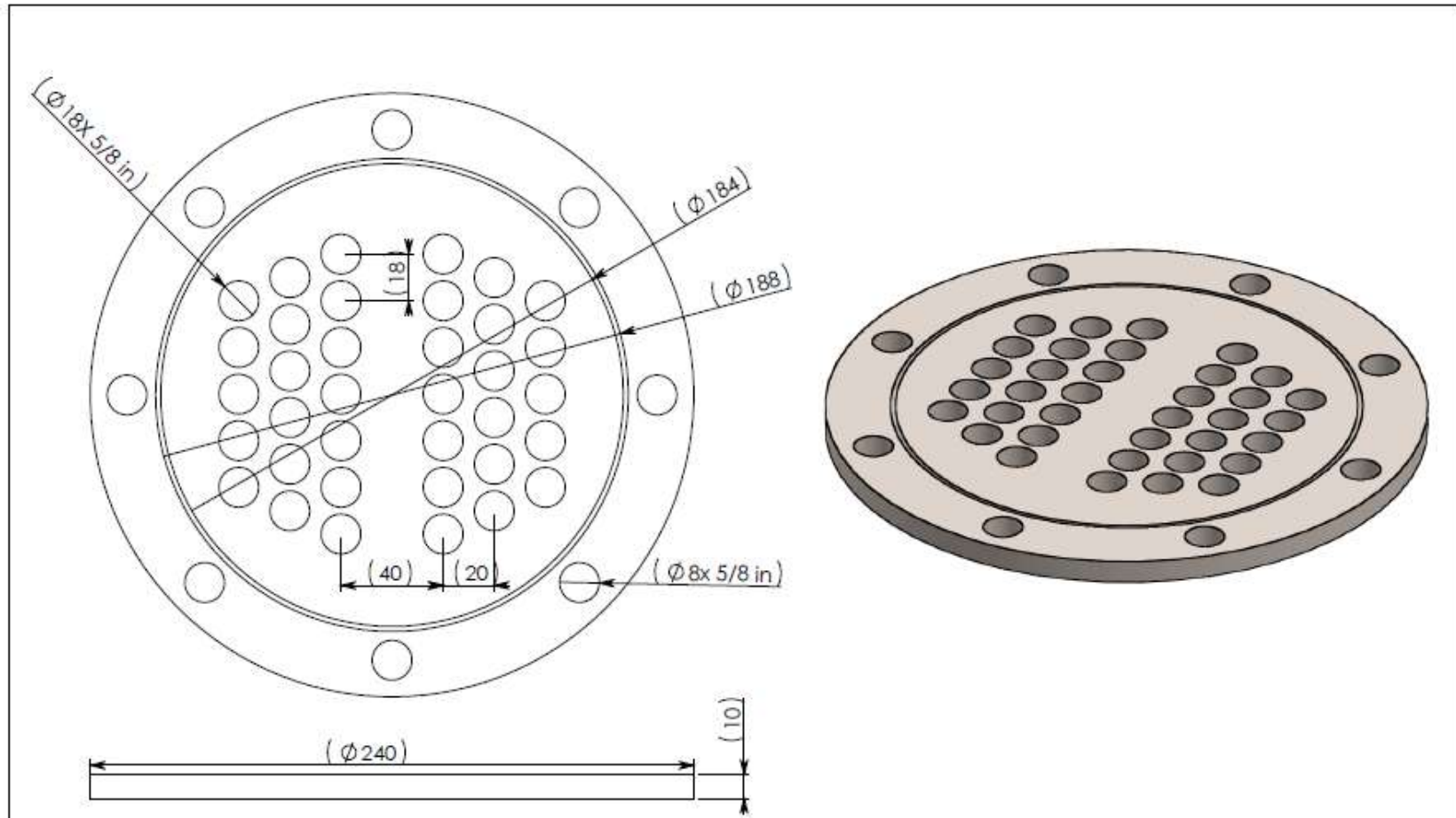
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			CONDENSADOR		MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 10	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERANCIAS Lineal:0.1mm Angular:0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval	01-01-00



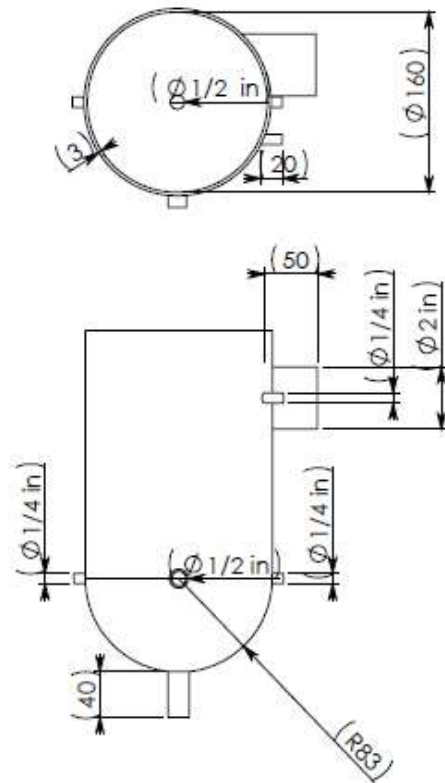
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			TAPA CONDENSADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 3	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



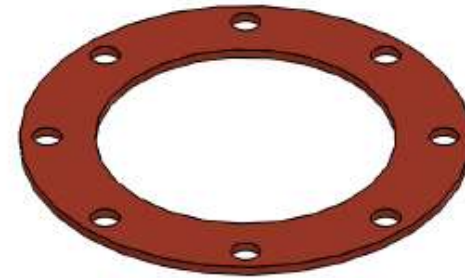
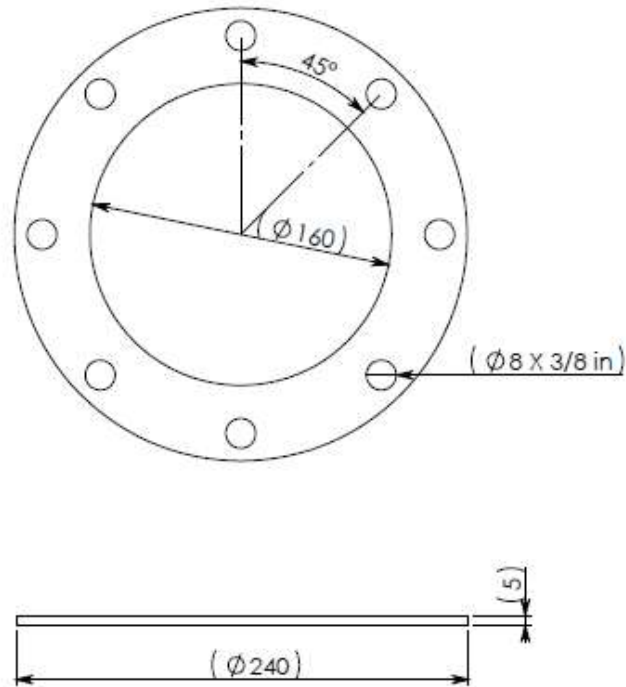
 CONSTRUIMOS FUTURO	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			BRIDA CASCO CONDENSADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 3	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval




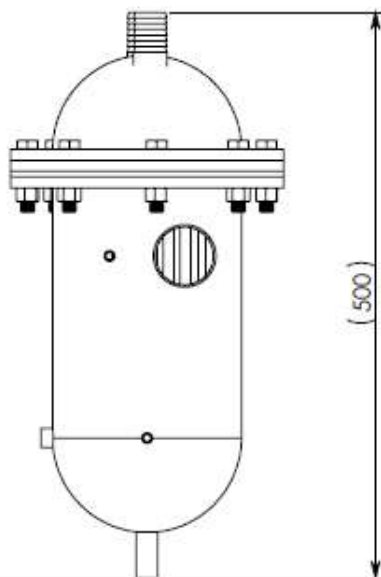
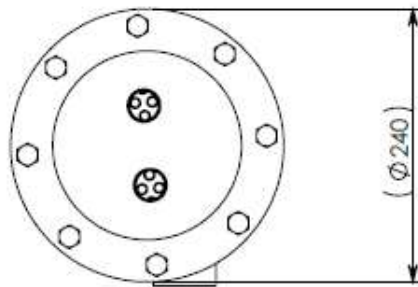
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		BRIDA TUBOS CONDENSADOR		MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 2	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



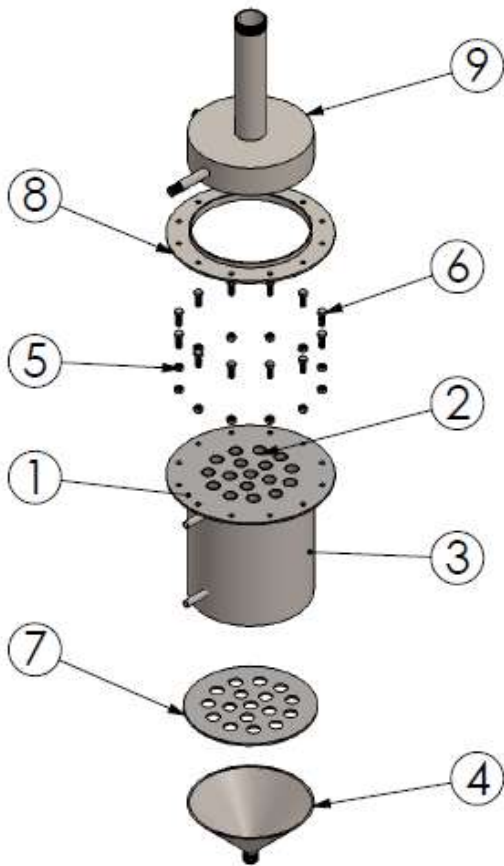
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		CASCO CONDENSADOR		MATERIAL: Acero Inoxidable	
 Universidad Industrial de Santander CONSTRUYENDO FUTURO	ESC: 1: 5	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval
					01-01-04



	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			EMPAQUE BRIDA CONDENSADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 3	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval

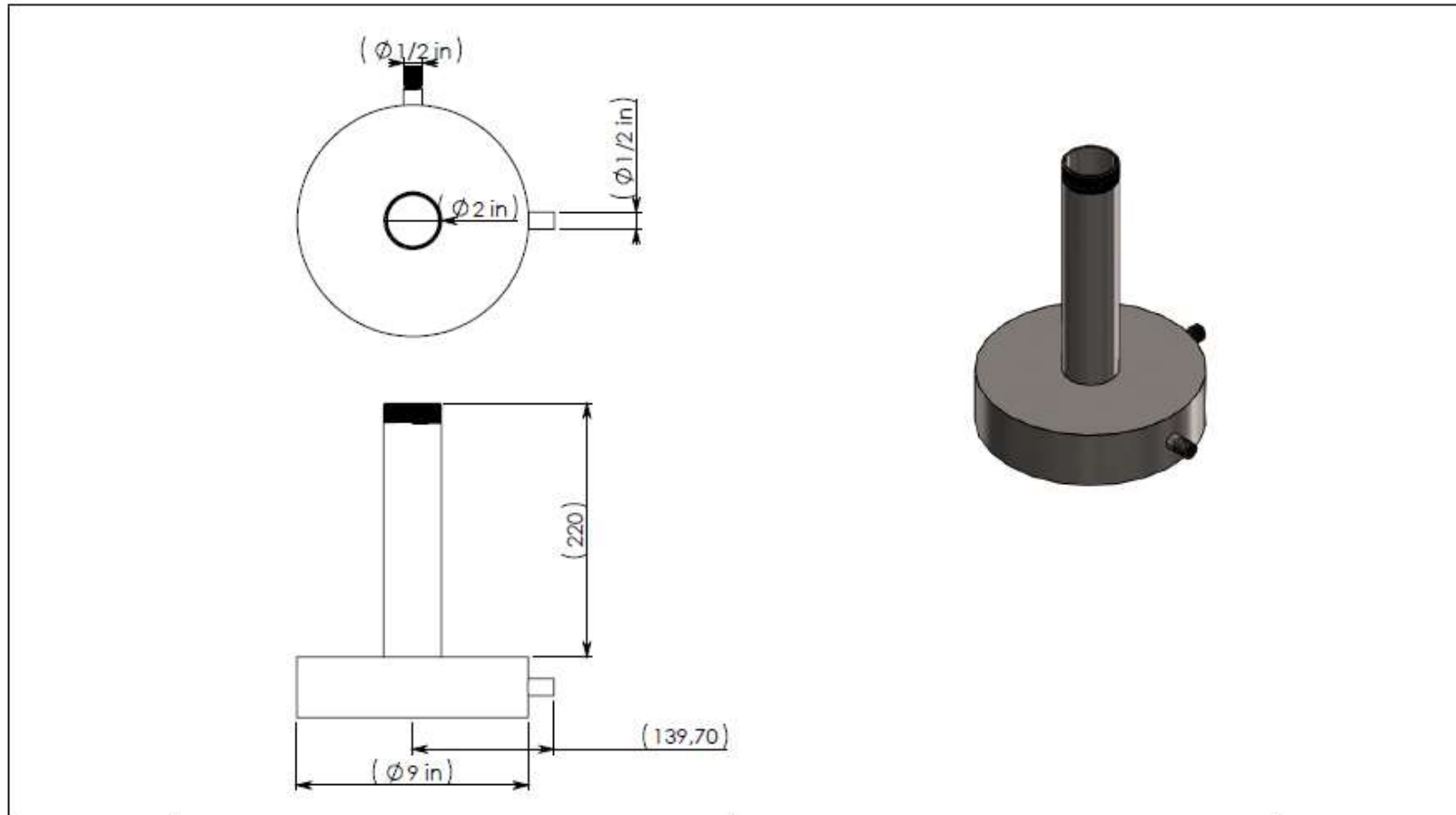


	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		ENSAMBLE CONDENSADOR		MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 5	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval

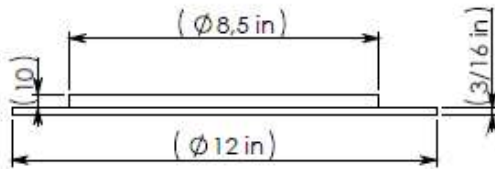
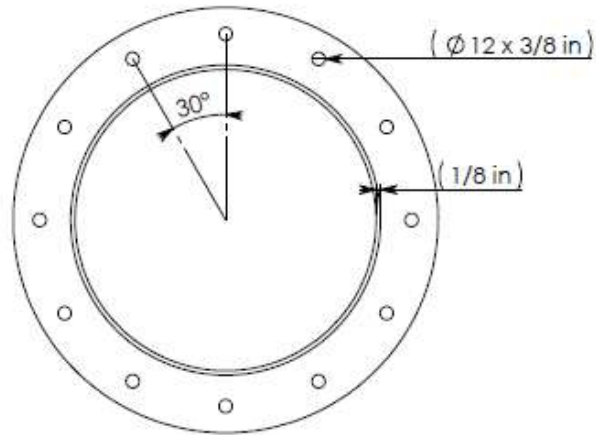


N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	BRIDA SUPERIOR TUBOS	ESPESOR 3/16"	1
2	TUBO	DIAMETRO 1"	17
3	CASCO EVAPORADOR	ESPESOR 1/8"	1
4	CONO INFERIOR	ESPESOR 1/8"	1
5	TUERCA TORNILLO CASCO	TUERCA DE 3/8"	12
6	TORNILLO BRIDA CASCO	TORNILLO DE 5/8"	12
7	BRIDA INFERIOR TUBOS	ESPESOR 3/16"	1
8	BRIDA SUPERIOR TAPA	ESPESOR 3/16"	1
9	TAPA BRIDA SUPERIOR	ESPESOR 3/16"	1

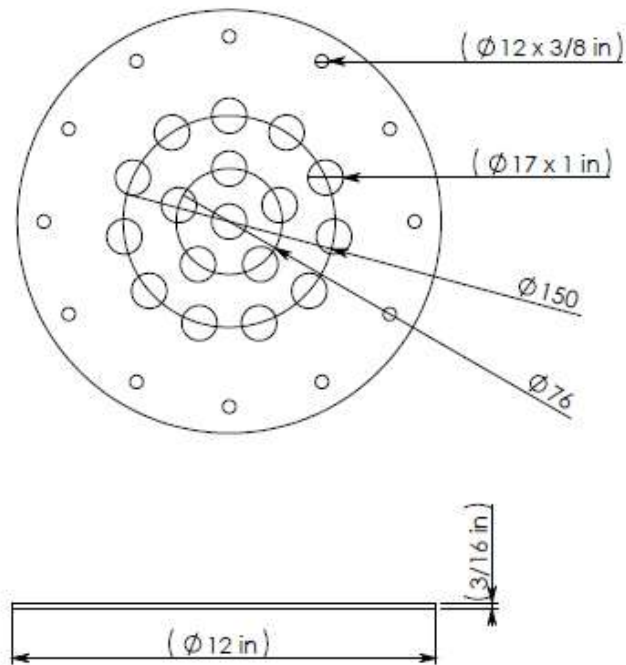
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1:10	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERANCIAS Lineal:0.1mm Angular:0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



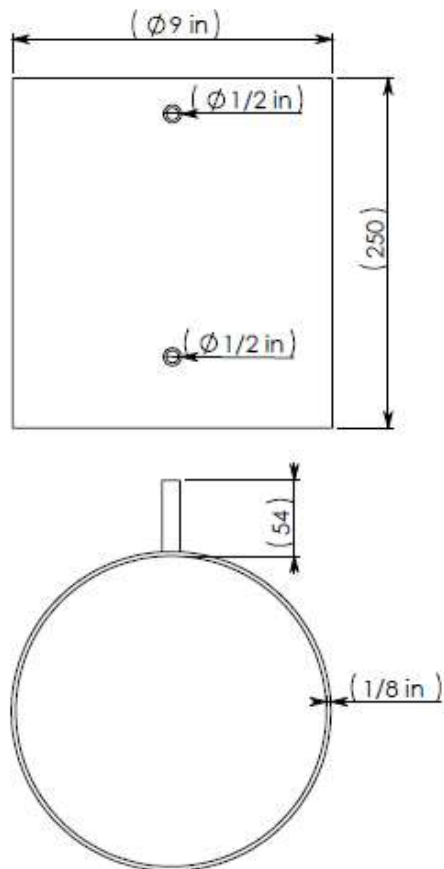
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			BRIDA SUPERIOR EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 5	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



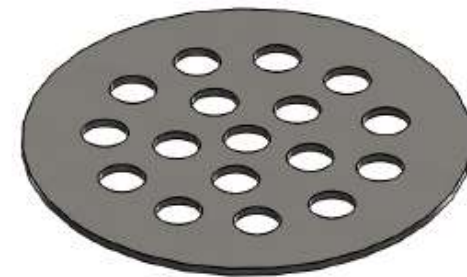
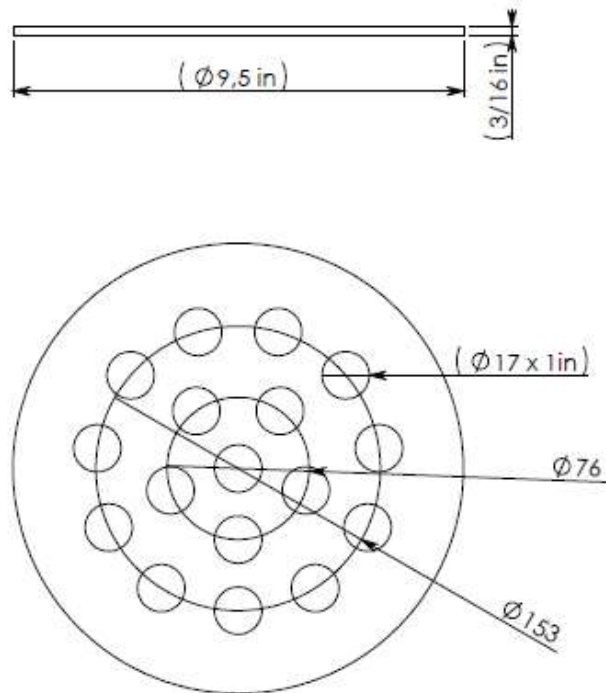
 CONSTRUIMOS ENTREGAMOS	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			BRIDA SUPERIOR 1 TUBOS EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 3	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



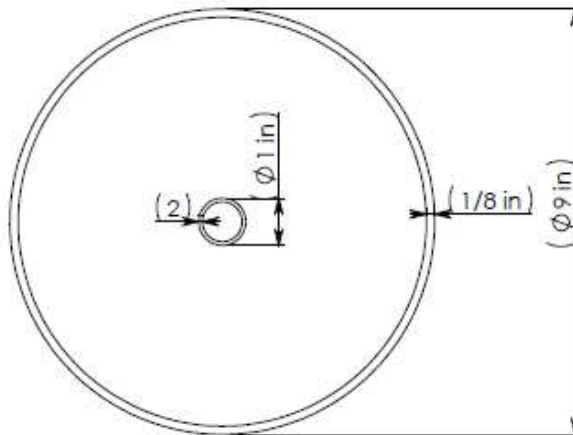
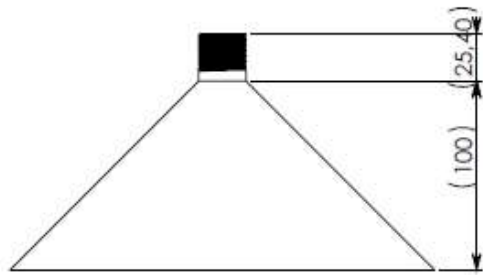
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			BRIDA SUPERIOR 2 TUBOS EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 4	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



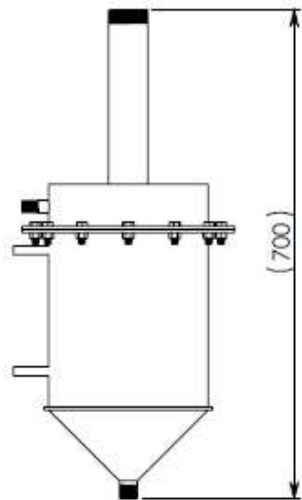
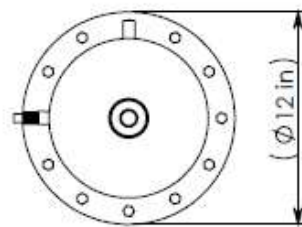
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			CASCO EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 4	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



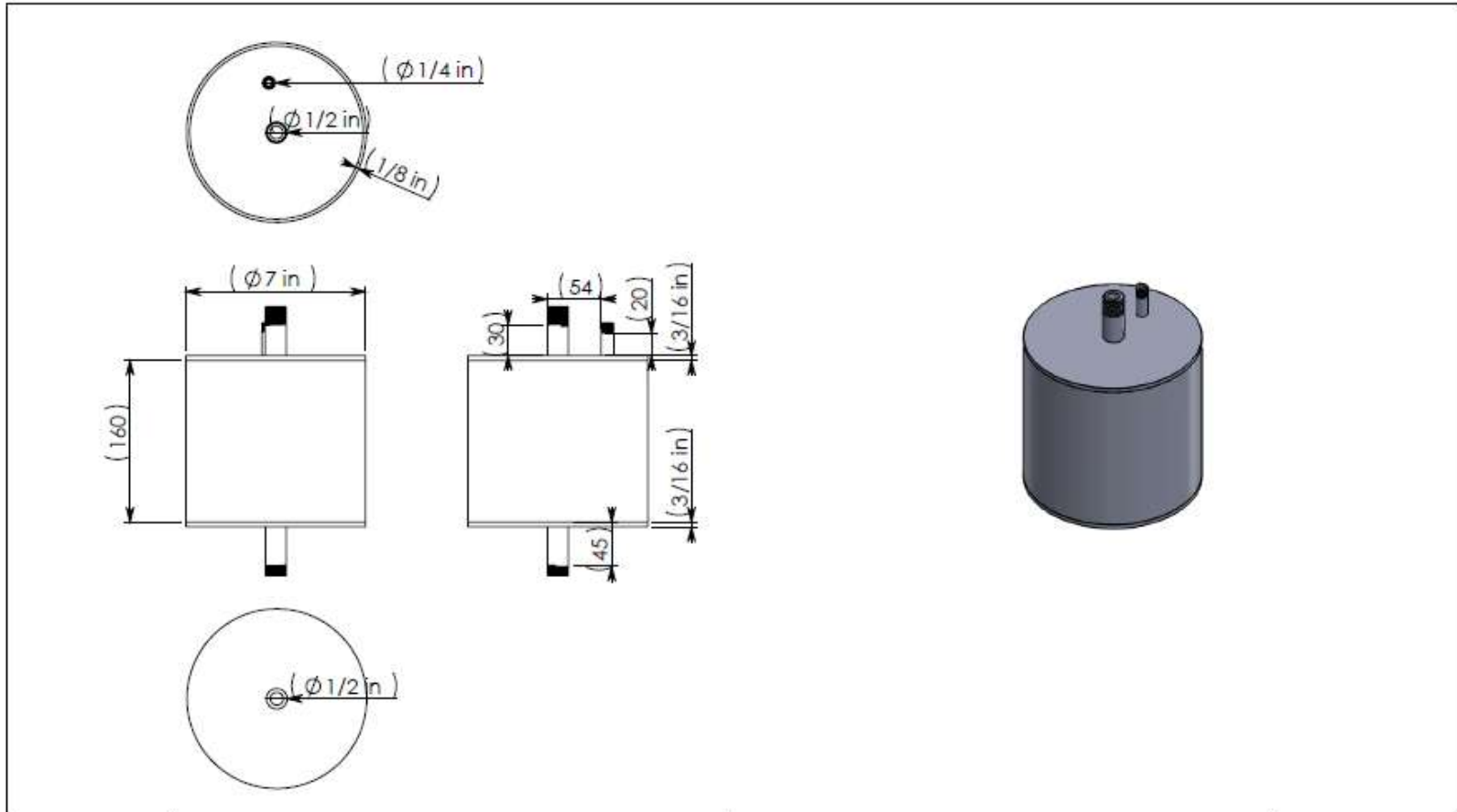
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			BRIDA INFERIOR TUBOS EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 3	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval




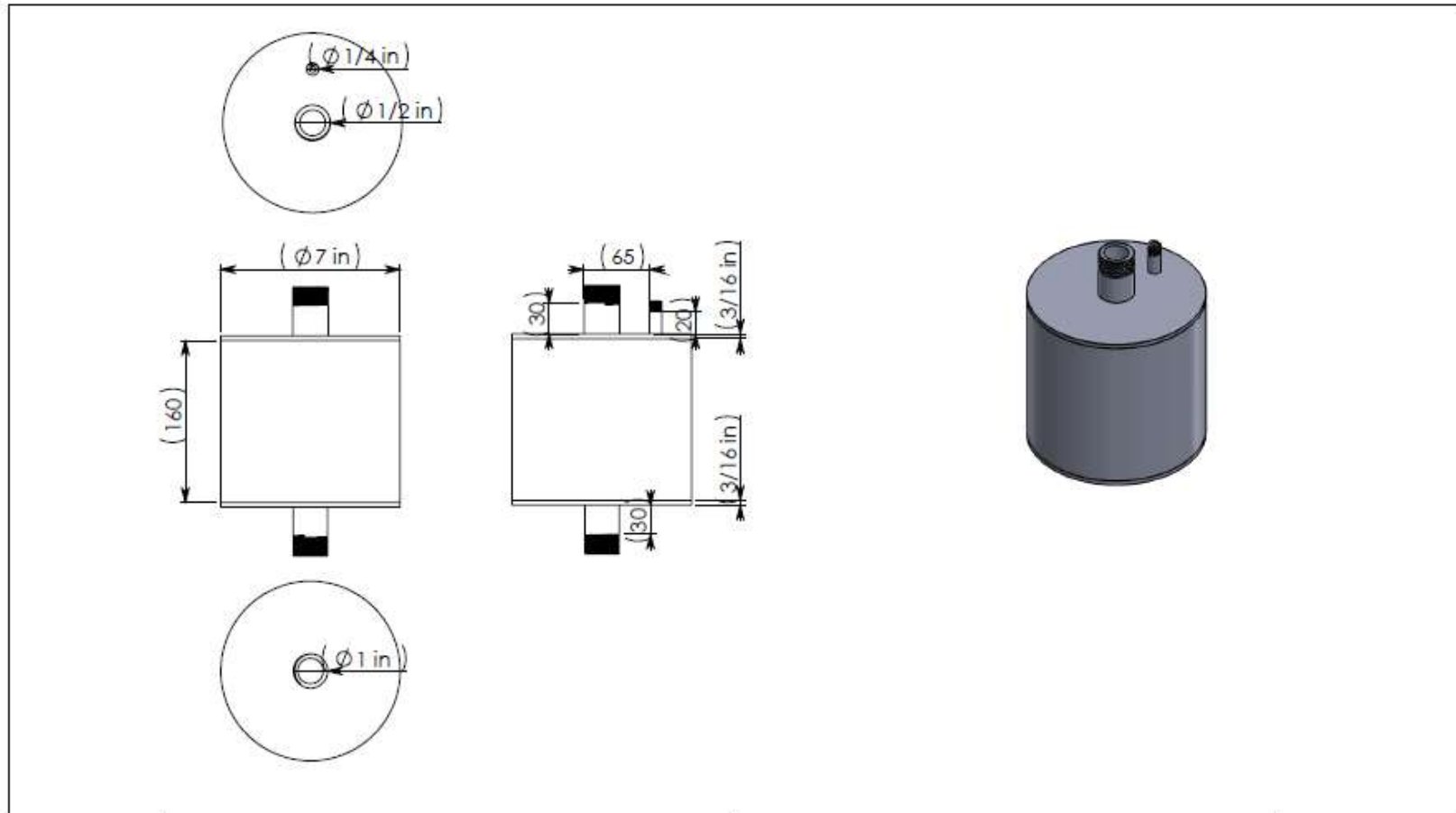
 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SINALOA	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			CONO EVAPORADOR		MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 3	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERANCIAS Lineal:0.1mm Angular:0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval	



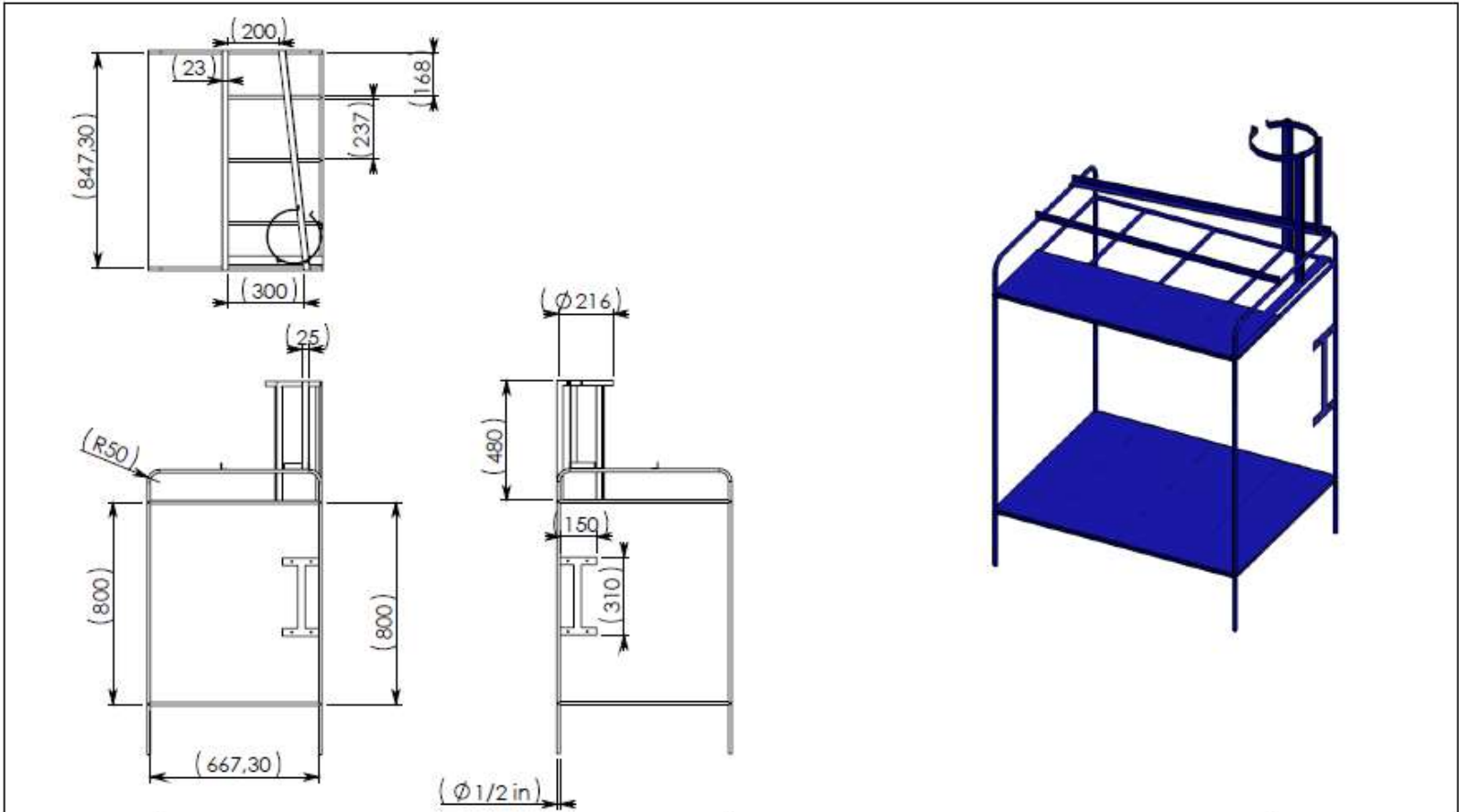
	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			ENSAMBLE EVAPORADOR	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 6	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



	<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>			<b>TANQUE CONDENSADO</b>	<b>MATERIAL:</b> Acero Inoxidable
	ESC: 1: 5	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	<b>FECHA</b> 25/09/14	<b>TOLERACIAS</b> Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



 CONSTRUIMOS INTEGRADO	ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA			TANQUE CONCENTRADO	MATERIAL: Acero Inoxidable
	ESC: 1: 5	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERACIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval



ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA		BASTIDOR		MATERIAL: Acero Inoxidable	
 UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE SINALOA	ESC: 1: 20	Si no se indica lo contrario las cotas se expresan en mm	FECHA 25/09/14	TOLERANCIAS Lineal: 0.1 mm Angular: 0.1°	Dibujado Por: Claudia Lorena Pedraza Rosas German Espinosa Sandoval
					01-04-01

## **ANEXO F. SISTEMAS DE EVAPORACIÓN AL VACÍO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES QUE EXISTEN ACTUALMENTE**

Después de haber realizado la investigación sobre algunos de los tipos de sistemas de evaporación al vacío en internet, se encontró la siguiente información de interés resumida a continuación.

### **EVAPORADOR CRISTALIZADOR DE CIRCULACIÓN FORZADA**

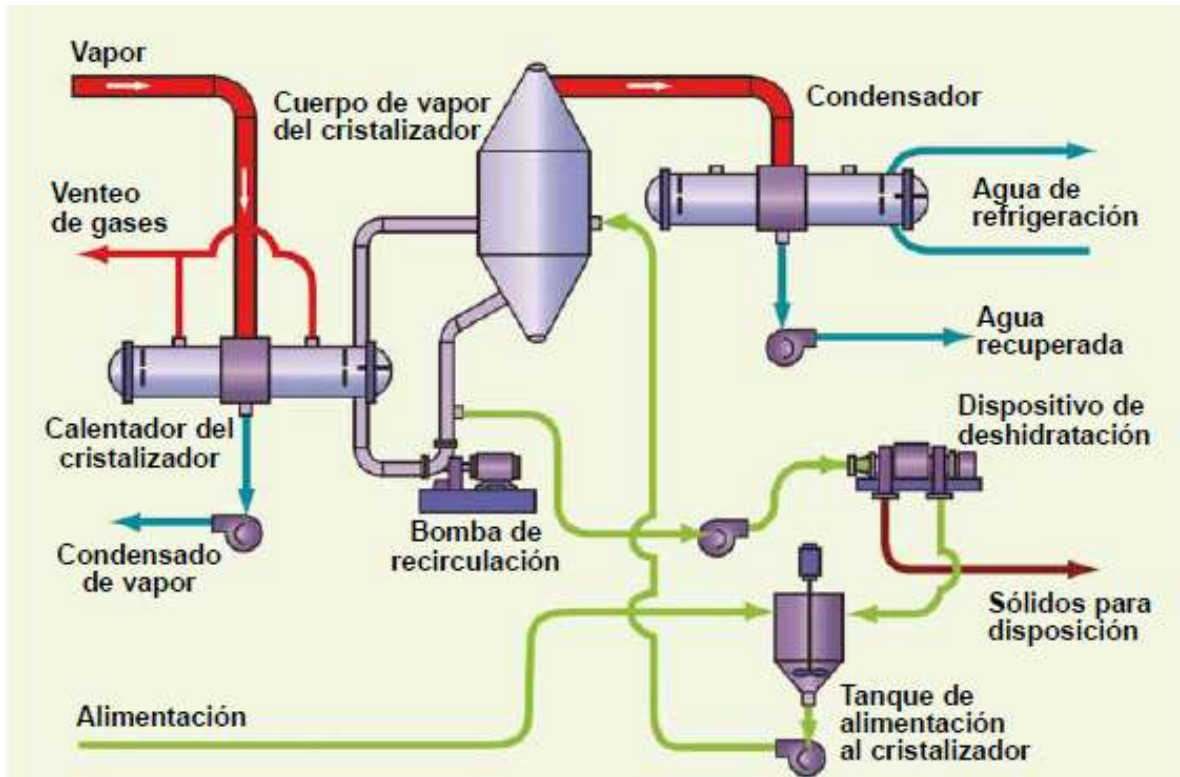
Este equipo está compuesto por una serie de elementos que permiten depurar agua por medio de evaporación al vacío, con un aporte energético ofrecido por vapor proveniente de una caldera y con un sistema de condensación que funciona con agua a baja temperatura (25 c) proveniente de una torre de enfriamiento, además de un dispositivo de separación mecánica de sólidos concentrados. Para explicar su funcionamiento se divide en subsistemas y a su vez se hablara de cada de los componentes que lo conforman.

En el diagrama A se pueden observar los diferentes nombres de los componentes, los cuales se tendrán en cuenta para un mejor entendimiento del funcionamiento del equipo de evaporación-cristalización. En el subsistema de suministro el agua a depurar es alimentada al tanque de alimentación al cristalizador, el cual está compuesto por un agitador mecánico que homogeniza los sólidos del agua a tratar, luego de este proceso una bomba lo inyecta al cuerpo de vapor del cristalizador; es allí donde ocurre el proceso de separación del vapor y el líquido concentrado. El subsistema de suministro de energía en forma de calor para el proceso de vaporización es aportado por una línea de vapor proveniente de una caldera, el vapor entra a un intercambiador de calor donde este le transfiere su energía calórica al agua del subsistema de recirculación. Este vapor pierde su energía y a su vez se condensa, este condensado es extraído por medio de una bomba dispuesta en la parte inferior del intercambiador de calor. El subsistema de recirculación está compuesto por el cuerpo del vapor cristalizador, la bomba de

recirculación de líquido concentrado y el intercambiador de calor de suministro, siendo aquí donde ocurre el proceso de vaporización; antes de línea de succión de la bomba de recirculación es extraído el concentrado por medio de otra bomba a cual lo conduce a un dispositivo de deshidratación, equipo que está diseñado para separar los sólidos de los líquidos; estos sólidos son un producto final de almacenamiento mientras que el líquido es realimentado al tanque de alimentación al cristalizador.

El subsistema de condensación está compuesto por un intercambiador de calor al cual por una parte le llega el vapor ya purificado y por la otra le ingresa agua a baja temperatura para retirarle la energía necesaria al vapor para condensarlo; esta agua se dispone de una torre de enfriamiento como ya se dijo y el condensado del vapor es extraído por medio de una bomba siendo este el agua recuperada.

Diagrama A. Funcionamiento de un evaporador-cristalizador de circulación forzada,



## EVAPORACION AL VACIO POR BOMBA DE CALOR

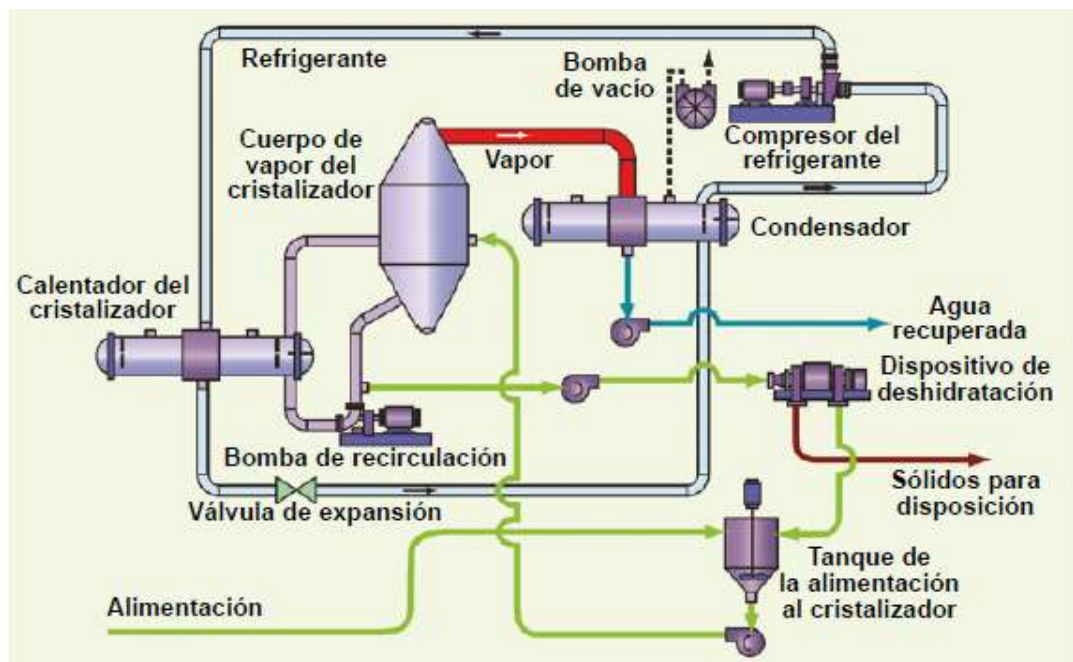
Este equipo se caracteriza por contar con un ciclo de bomba de calor utilizando sus componentes para los procesos de evaporación y condensación en el sistema de depuración de aguas residuales por evaporación al vacío.

El esquema B representa un diseño esquemático de un cristalizador para operar a baja temperatura y una presión 33 mbares. En este sistema el calor requerido para hervir la solución y el enfriamiento necesario para condensar el vapor de agua son suministrados por una bomba de calor. El fluido de refrigeración se calienta por compresión en el compresor del refrigerante. La energía eléctrica, que mueve el

motor del compresor, proporciona el trabajo que es la fuente de calor para el calentador del cristalizador. Parte del calor proporcionado al refrigerante por el compresor es transferido a la solución de proceso en el intercambio de calor del cristalizador por condensación del refrigerante. El líquido de refrigeración fluye a través de la válvula de expansión al condensador, donde se evapora por transferencia de calor desde el vapor de agua condensada del cristalizador. El ciclo se cierra cuando el flujo refrigerante vuelve al compresor.

Este equipo al igual que el evaporador cristalizador cuenta con el sistema de recirculación de concentrado y del dispositivo de deshidratación.

Esquema B. Esquema de un evaporador al vacío de bomba de calor.



# ANEXO G. REPORTE DE RESULTADOS DE LA SIAMA DEL EFLUENTE UIS



SERVICIOS INTEGRADOS  
PARA LA INDUSTRIA DEL AGRO,  
MINERO-ENERGETICA Y  
EL MEDIO AMBIENTE  
NT- 504.016.153-1



## REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 18 de Septiembre de 2014		No. 066468
Delitante: AVDESA MAC POLLO	Tipo de muestra: Agua	Identificación: EFLUENTE PTAR MB
Dirección: Km 3 Vía Palmique - Café Mielal - Bge	Descripción: Agua Residual	Responsable de muestra: SOLICITANTE
Teléfono: 8780526	Procedimiento de muestra: SOLICITANTE	Tamaño de la muestra: 5000 ml
Lugar de muestreo: AFLUENTE	Envase o empaque: Plástico / vidrio	Plan de muestreo: 0
Fecha de muestreo: 11 de Septiembre de 2014	Plazo de muestreo: 0	Tipo de muestra: Porción
Fecha de recepción: 11 de Septiembre de 2014		
Fecha de análisis: 11 a 18 de septiembre de 2014		
Análisis solicitado: Fisicoquímico		
Condiciones de la muestra: Refrigerada		

## ANÁLISIS FISICOQUÍMICO

VARIABLE	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
CLORURO	DI. Mh. 4500-Cl-E	2,0	mg Cl/L
NITROGENO TOTAL	DI. Mh. 4500-Norg-C	27,16	mg N/L
NITROGENO AMONICAL	DI. Mh. 4500-NH <sub>3</sub> -C	4,15	mg N/L
SULFATO	DI. Mh. 4500-SO <sub>4</sub> -E	<5	mg SO <sub>4</sub> /L
NITRATO	RODER	<0,3	mg NO <sub>3</sub> - N/L
NITRITO	DI. Mh. 4500 NO <sub>2</sub> -E	<0,02	mg NO <sub>2</sub> - N/L
ORTOFOSFATO	DI. Mh. 4500 P-BE	<0,05	mg P/L
FOSFORO TOTAL	DI. Mh. 4500 P-BE	0,11	mg P/L
TENSIOACTIVOS	DI. Mh. 5042-C	0,56	mg SAAB/L
DOO	DI. Mh. 5220-C	226	mg O <sub>2</sub> /L
DSO <sub>5</sub>	DI. Mh. 5210-B	121	mg O <sub>2</sub> /L
GRASAS Y ACEITES	DI. Mh. 5003-D	36,3	mg/L
SOLIDOS SEDIMENTABLES	DI. Mh. 2540-F	<0,1	mg/L
SOLIDOS TOTALES	DI. Mh. 2540-B	<30	mg/L
SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	DI. Mh. 2540-D	<10	mg/L

\* Parámetros controlados por IDEAM Res. 2886/12

OBSERVACIONES: DI. Mh.: STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATERS AND WASTEWATER. APWA, WEF, APHA 22th. SAAB: calculado como Detergente sintético, en agua (SDS)

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA

Elaboró:	 SERGIO ALEXANDER ROJAS S. DIRECTOR DE FISICOQUÍMICA ING. BIOTECNOLÓGICO	Revisó:	 EDISON DÁVILA M. P. OZ. H. COORDINADOR DE FISICOQUÍMICA QUÍMICO. PG 4531
Código:	A-031	Versión:	07
Fecha:	22/05/2009	Página:	1 de 1

Carrera 24 No. 38 - 11 Tels: (7) 6348000 - (7) 6348800 - 3187070821 Bucaramanga - Colombia  
web: www.siamatda.com - e-mail: info@siamatda.com

## ANEXO H. REPORTE DE RESULTADOS DE LA SIAMA DEL EFLUENTE EMPRESA AVÍCOLA



**SERVICIOS INTEGRADOS  
PARA LA INDUSTRIA DEL AGRO,  
MINERO-ENERGETICA Y  
EL MEDIO AMBIENTE**  
NIT. RM.098.152-5



### REPORTE DE RESULTADOS

Ciudad y Fecha de emisión: Bucaramanga, 10 de septiembre de 2014		No. 066430
Bolcitante: <b>AVIDESA MAC POLLO</b>	Tipo de muestra: Agua	
Dirección: Km 3 Via Palenque - Café Madrid - Bga	Identificación: <b>EFLUENTE PTAR</b>	
Teléfono: 0780506	Descripción: Agua Residual	
Lugar de muestreo: <b>PLANTA DE HARINAS</b>	Responsable de muestreo: <b>SOLICITANTE</b>	
Fecha de muestreo: 11 de septiembre de 2014	Procedimiento de muestreo: <b>SOLICITANTE</b>	
Fecha de recepción: 11 de septiembre de 2014	Tamaño de la muestra: 5000 ml	
Fecha de análisis: 11 a 18 de septiembre de 2014	Envase o empaque: Plástico / vidrio	
Análisis solicitado: Físicoquímico	Plan de muestreo: <b>X</b>	
Condiciones de la muestra: Refrigeradas	Tipo de muestreo: Puntual	

### ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICO

VARIABLE	MÉTODO	RESULTADOS	UNIDADES
CLORUROS	St. Mh. 4500-Cl-E	378	mg Cl/L
NITRÓGENO TOTAL	St. Mh. 4500-Norg C	266	mg N/L
NITRÓGENO AMONÍACAL	St. Mh. 4500-NH <sub>3</sub> C	247	mg N/L
SULFATOS	St. Mh. 4500 SO <sub>4</sub> E	44,8	mg SO <sub>4</sub> /L
NITRATOS	RODIER	<0,3	mg NO <sub>3</sub> - NIL
NITRITOS	St. Mh. 4500 NO <sub>2</sub> B	<0,02	mg NO <sub>2</sub> - NIL
ORTOFOSFATOS	St. Mh. 4500 P BE	0,35	mg P/L
FOSFORO TOTAL	St. Mh. 4500 P BE	0,47	mg P/L
TENSIOACTIVOS	St. Mh. 5540 C	< 0,27	mg SAAM/L
*DQO	St. Mh. 5220 G	1808	mg O <sub>2</sub> /L
*DBO <sub>5</sub>	St. Mh. 5210 B	1508	mg O <sub>2</sub> /L
*GRASAS Y ACEITES	St. Mh. 5520 D	44,3	mg/L
*SÓLIDOS SEDIMENTABLES	St. Mh. 2540 F	< 0,1	ml/L
*SÓLIDOS TOTALES	St. Mh. 2540 B	812	mg/L
*SÓLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES	St. Mh. 2540 D	10,8	mg/L

\* Parámetros acreditados por IDEAM Res. 2898/12

OBSERVACIONES: St. Mh. STANDARD METHODS FOR EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. APWA, WEF, APHA 22th. SAAM, calculado como Dodecilo sulfato, sal sódica (SDS)

Los resultados son válidos para la muestra analizada. No se pueden reproducir sin la previa autorización de SIAMA

Elaboró:  <b>SERGIO ALEXANDER ROJAS S</b> DIRECTOR DE FÍSICOQUÍMICA ING. BIOTECNOLÓGICO	Revisó:  <b>EDINSON DAVID LOPEZ H.</b> COORDINADOR DE FÍSICOQUÍMICA QUÍMICO, PQ 4551						
Código	R-051	Versión	0.1	Fecha	22/05/2009	Página	1 de 1

Carrera 24 No. 36 - 11 Tels: (7) 6348000 - (7) 6348800 - 3187070821 Bucaramanga - Colombia  
web: www.siamaltda.com - e-mail: info@siamaltda.com