

**DISEÑO ESQUEMÁTICO DE LAS REDES DE VAPOR, AGUA DE PROCESO Y  
AGUA RESIDUAL DE LA PLANTA PILOTO**

**DANNA ALEJANDRA DURÁN MONCADA  
CHRISTIAN ANDRÉS MONSALVE SANABRIA**

**Proyecto integral de grado para optar el título de  
Ingeniero Químico**

**Director**

**Luis Alberto Figueroa Casallas  
Ingeniero Químico**

**Codirector**

**Juan Camilo Cely Garzón  
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ D.C.**

**2021**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Firma Docente Jurado 1

---

Firma Docente Jurado 2

Bogotá, D.C. Julio de 2021.

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio Cesar Fuentes Arismendi

Directora del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Ospina

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres por su amor, trabajo y sacrificio, gracias a ustedes por creer en mí y siempre estar para brindarme las palabras correctas; por ustedes he logrado llegar hasta acá y ser quien soy hoy. A mi hermano por acompañarme durante el proceso y darme su apoyo moral.

***Danna Alejandra Durán Moncada***

A mi Mamá, que es lo más importante que tengo en la vida, quien me ha dado todo y enseñado los valores y principios que me han hecho ser lo que soy ahora.

A mi pareja, que durante los últimos años ha estado siempre para mi apoyándome, brindándome la paz y tranquilidad para superar cada problema y dificultad que se han presentado.

A mis amigos y seres queridos, quienes siempre han estado a mi lado, acompañándome y ayudándome en mis proyectos.

***Christian Andrés Monsalve Sanabria***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por la bendición de despertar cada día, por guiarme en este camino y darme la fuerza para afrontar cada batalla. Por ser el apoyo en los momentos más difíciles durante todo el proceso y la inspiración para culminar de manera exitosa el proyecto.

Agradezco a cada persona que supo ser luz durante los días de tormenta y me brindó una mano.

Al director de tesis Luis Figueroa quien con su dirección, conocimiento, enseñanza y colaboración permitió el desarrollo de este trabajo.

Por último, agradezco a la Universidad de América, directivos y profesores que fueron una pieza clave durante la formación profesional y personal.

***Danna Alejandra Durán Moncada***

A mi madre, cuando no tenía a quien acudir, sabía que podía contar ella, cuando todos los caminos se cerraban, su puerta siempre está y estará abierta para mí

y cuando todo se ponía difícil ahí estaba ella a mi lado diciéndome que todo saldría bien, gracias por todo lo que hiciste y por todo lo que serías capaz de hacer si te lo hubiera pedido, sin ella no sería quien soy actualmente, todo se lo debo a ella.

A mis amigos y compañeros de la carrera, de quienes aprendí muchas cosas y con quienes viví muchas experiencias.

A mis profesores de la carrera, quienes me transmitieron infinidad de conocimientos y enseñanzas para la vida.

A la Universidad de América, por todo el conocimiento brindado en el camino de la ingeniería.

***Christian Andrés Monsalve Sanabria***

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.



## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCIÓN</b>	18
<b>OBJETIVOS</b>	20
<b>1. SERVICIOS PARA LAS UNIDADES DE PROCESO</b>	21
1.1 Planta Piloto Universidad de América	21
1.2 Unidades de Proceso	22
<i>1.2.1 Banco de Reactores</i>	22
<i>1.2.2 Planta de Absorción de Gases</i>	27
<i>1.2.3 Planta de Destilación</i>	33
<i>1.2.4 Planta de Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido</i>	37
<i>1.2.5 Secador de Bandejas</i>	43
<i>1.2.6 Tren de Evaporación</i>	46
1.3 Dimensiones	52
1.4 Servicios Industriales	54
<i>1.4.1 Agua de Proceso</i>	55
<i>1.4.2 Agua Residual</i>	55
<i>1.4.3 Vapor</i>	56
<b>2. REQUERIMIENTOS</b>	58
2.1 Agua de Proceso	58
2.2 Agua de Residual	59
2.3 Vapor	62
2.4 Tuberías	63
<b>3. NORMATIVIDAD</b>	66
3.1 Servicios industriales	66

<b>3.2 Sistema contra incendios</b>	71
<b>3.3 Tubería</b>	73
<b>3.4 Emisiones de gases</b>	75
<b>3.5 Emisión de ruido</b>	79
<b>3.6 Duchas de emergencia</b>	79
<b>4. MEMORIAS DE CÁLCULO</b>	81
<b>4.1 Flujo de Fluidos en Tuberías</b>	81
<b>4.1.1 Caudal</b>	87
<b>4.1.2 Diámetro</b>	88
<b>4.1.3 Pérdidas</b>	89
<b>4.2 Aislamiento</b>	91
<b>4.3 Potencia de Bombeo y Presión</b>	94
<b>4.4 Consideraciones para Vapor</b>	95
<b>5. PROGRAMACIÓN DE LOS SERVICIOS</b>	96
<b>5.1 Herramienta Programada</b>	96
<b>5.1.1 VBA</b>	97
<b>5.1.2 Generalidades</b>	97
<b>5.1.3 Propiedades</b>	100
<b>5.1.4 Caudal</b>	103
<b>5.1.5 Diámetro</b>	106
<b>5.1.6 Pérdida de Carga</b>	108
<b>5.1.7 Selección de Tubería</b>	111
<b>5.1.8 Aislamiento</b>	115
<b>5.1.9 Potencia de Bombeo y Presión</b>	117
<b>5.2 Validación de la Herramienta</b>	119

<b>5.3 Descarga de la Herramienta</b>	126
<b>6. PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN DE REDES</b>	128
<b>6.1 Distribución de los Equipos</b>	128
<b>6.2 Diseño de cárcamo</b>	132
<b>6.3 Diseño de la red de agua de proceso</b>	133
<b>6.4 Diseño de la red de agua para las duchas de seguridad</b>	138
<b>6.5 Diseño de la red de agua residual</b>	143
<b>6.6 Diseño de vapor</b>	146
<b>6.7 Espesor de aislante para la tubería de vapor</b>	149
<b>7. CONCLUSIONES</b>	152
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	154
<b>ANEXOS</b>	157

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1</b> Aplicaciones industriales de reactores	23
<b>Figura 2</b> Tanque de almacenamiento de reactivo y precalentador	24
<b>Figura 3</b> Reactor CSTR	25
<b>Figura 4</b> Reactor tubular y reactor multi tubular	26
<b>Figura 5</b> Tanque de almacenamiento de productor y enfriador	27
<b>Figura 6</b> Compresor	28
<b>Figura 7</b> Humidificador de aire	29
<b>Figura 8</b> Torre de absorción empacada	30
<b>Figura 9</b> Tanque de almacenamiento de solvente	31
<b>Figura 10</b> Tanque recolector de solvente gastado	31
<b>Figura 11</b> Trampa de vacío	32
<b>Figura 12</b> Tanques de almacenamiento de solvente y alimento	34
<b>Figura 13</b> Columna de destilación	35
<b>Figura 14</b> Rehervidor y tanque de almacenamiento de producto de fondos	35
<b>Figura 15</b> Condensador y tanque de almacenamiento de producto de cimas	36
<b>Figura 16</b> Tanque de fluido calefactor	38
<b>Figura 17</b> Percolador	39
<b>Figura 18</b> Condensador	40
<b>Figura 19</b> Tanque concentrador y desflemador	41
<b>Figura 20</b> Colectores de solvente	42
<b>Figura 21</b> Trampa de vacío	43
<b>Figura 22</b> Ventilador	44
<b>Figura 23</b> Adecuación de humedad y calentador de resistencia	45
<b>Figura 24</b> Secador de bandejas	46
<b>Figura 25</b> Tanque de alimentación	47
<b>Figura 26</b> Evaporador de chaqueta	48
<b>Figura 27</b> Evaporador de calandria	49
<b>Figura 28</b> Evaporador de circulación forzada	50

<b>Figura 29</b> Tanque de almacenamiento de producto	51
<b>Figura 30</b> Condensador	52
<b>Figura 31</b> Requerimiento de flujo total de agua de proceso	59
<b>Figura 32</b> Volumen de agua residual de los equipos de las unidades de proceso	60
<b>Figura 33</b> Cálculo del caudal total de acuerdo con las diferentes unidades de proceso	61
<b>Figura 34</b> Flujo total de vapor para las unidades de proceso	63
<b>Figura 35</b> Perfil de velocidad de acuerdo con el régimen del fluido	85
<b>Figura 36</b> Perfil de flujo de acuerdo con el régimen del fluido	86
<b>Figura 37</b> Diagrama en vista frontal de la tubería con recubrimiento	92
<b>Figura 38</b> Página inicio	98
<b>Figura 39</b> Código de programación botón calcular diámetro	99
<b>Figura 40</b> Código de programación botón regresar	99
<b>Figura 41</b> Código de programación botón regresar	100
<b>Figura 42</b> Input propiedades	101
<b>Figura 43</b> Hoja documento Excel: “prop”	102
<b>Figura 44</b> Código botón “cargar propiedades”	102
<b>Figura 45</b> Input caudal	103
<b>Figura 46</b> Factor de Crane para accesorios	104
<b>Figura 47</b> Código para el cálculo de caudal	105
<b>Figura 48</b> Input diámetro	106
<b>Figura 49</b> Código para el cálculo de diámetro	107
<b>Figura 50</b> Input pérdidas	108
<b>Figura 51</b> Código para adicionar accesorios	109
<b>Figura 52</b> Código para eliminar accesorios	109
<b>Figura 53</b> Encabezado de tabla para cálculo de pérdidas	109
<b>Figura 54</b> Código para el cálculo de pérdidas	110
<b>Figura 55</b> Input selección	112
<b>Figura 56</b> Hoja alterna “pipe”	113
<b>Figura 57</b> Código para la selección de tubería	114
<b>Figura 58</b> Input aislante	115

<b>Figura 59</b> Código cálculo de calor	116
<b>Figura 60</b> Código espesor aislante	116
<b>Figura 61</b> Hoja de iteraciones	117
<b>Figura 62</b> Input “P Bomba”	117
<b>Figura 63</b> Código para los cálculos referentes a la bomba	118
<b>Figura 64</b> Input propiedades	119
<b>Figura 65</b> Input pérdidas	120
<b>Figura 66</b> Comparación de resultados	120
<b>Figura 67</b> Resultado de caudal por la herramienta	121
<b>Figura 68</b> Resultado de diámetro por la herramienta	121
<b>Figura 69</b> Ejercicio de transferencia de calor	122
<b>Figura 70</b> Resultados de calor	123
<b>Figura 71</b> Ejercicio planteado para la potencia y presión de la bomba	123
<b>Figura 72</b> Input “P Bomba”	124
<b>Figura 73</b> Definición de la corriente en HYSYS	125
<b>Figura 74</b> Resultado de caída de presión en HYSYS	125
<b>Figura 75</b> Input pérdidas	126
<b>Figura 76</b> Código QR	127
<b>Figura 77</b> Dimensiones de los salones primer nivel	129
<b>Figura 78</b> Dimensiones de los salones segundo nivel	129
<b>Figura 79</b> Distribución de unidades de proceso en el primer nivel de la planta, salones M16 y M15	131
<b>Figura 80</b> Distribución de unidades de proceso en el segundo nivel de la planta, salones M14 y comedor	131
<b>Figura 81</b> Cárcamo	133
<b>Figura 82</b> Red de agua de proceso	134
<b>Figura 83</b> Selección de tubería para la red de agua de proceso	135
<b>Figura 84</b> Propiedades del fluido	135
<b>Figura 85</b> Perdidas de carga	136
<b>Figura 86</b> Criterios de selección de bombas	137
<b>Figura 87</b> Potencia de bombeo	138

<b>Figura 88</b>	Red de agua para duchas de emergencia	139
<b>Figura 89</b>	Selección de tubería para la red de agua de duchas de emergencia	140
<b>Figura 90</b>	Perdidas de carga	141
<b>Figura 91</b>	Criterios de selección de bombas	142
<b>Figura 92</b>	Potencia de bombeo	143
<b>Figura 93</b>	Red de agua residual para planta piloto	144
<b>Figura 94</b>	Propiedades de los fluidos para la red de agua residual	144
<b>Figura 95</b>	Selección de tubería para la red de agua residual	145
<b>Figura 96</b>	Perdidas de carga	146
<b>Figura 97</b>	Red de vapor	147
<b>Figura 98</b>	Selección de tubería para la red de vapor	148
<b>Figura 99</b>	Propiedades del fluido	148
<b>Figura 100</b>	Perdidas de carga	149
<b>Figura 101</b>	Calor perdido sin aislamiento	150
<b>Figura 102</b>	Aislamiento	151

## LISTA DE TABLAS

	pág.
<b>Tabla 1</b> Dimensiones de las unidades de proceso.	53
<b>Tabla 2</b> Dimensiones de las unidades de proceso con el factor de seguridad.	54
<b>Tabla 3</b> Selección del material para la fabricación de la tubería dependiendo del químico al que será expuesta.	65
<b>Tabla 4</b> Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles de aguas residuales para el vertimiento al alcantarillado.	68
<b>Tabla 5</b> Niveles máximos permisibles para contaminantes.	76
<b>Tabla 6</b> Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos cancerígenos.	77
<b>Tabla 7</b> Principales sustancias generadores de olores ofensivos-umbral.	78
<b>Tabla 8</b> Factor L/D para cada accesorio.	82
<b>Tabla 9</b> Rugosidad interna de la tubería.	84
<b>Tabla 10</b> Dimensiones de los salones M16, M15, M14 y comedor.	128
<b>Tabla 11</b> Dimensiones modificadas de los salones M16, M15, M14, M13 y comedor.	130



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo consiste en el desarrollo de una herramienta de cálculo programado. La cual permita establecer la distribución de las redes de los servicios de agua de proceso, agua residual y vapor, para la planta piloto de la Fundación Universidad de América.

En primera instancia se realizó una descripción de las unidades de proceso con las que se cuenta actualmente, siendo estas el banco de reactores, la planta de absorción, la planta de destilación, la planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido, el secador de bandejas y el tren de evaporación, utilizando las hojas de especificaciones del fabricante. Además, se establecieron los requerimientos de los servicios de agua de proceso y vapor en términos de flujo, siendo estos  $9.58 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $80.6 \text{ kg/h}$  respectivamente, considerando un factor de seguridad del 30%, y para el agua residual un caudal máximo de  $16.03 \text{ L/s}$  para los equipos y  $17.784 \text{ m}^3/\text{h}$  para las duchas de seguridad.

En segunda instancia se realizó la recopilación de la normativa nacional e internacional para los servicios mencionados, la tubería aplicable, duchas de seguridad, sistema contra incendios y emisiones de ruido y gases.

En tercera instancia con el uso de memorias de cálculo se realizó la programación en Visual Basic for Applications y se estableció la distribución de las redes de agua de proceso, agua residual y vapor.

Por último, se presenta una propuesta de diseño esquemático de las redes de agua de proceso, agua residual y vapor, utilizando dicha herramienta y AutoCAD.

**PALABRAS CLAVE:** Planta piloto, agua de proceso, agua residual, vapor, redes, normativa, requerimientos y Visual Basic for Applications.

## INTRODUCCIÓN

Este documento de trabajo de grado comprende cinco capítulos, en función de cumplir cuatro objetivos específicos y el objetivo general presentado en el siguiente apartado. Estos capítulos se titulan: servicios para las unidades de proceso, requerimientos, normatividad, metodologías de cálculo y programación de los servicios.

Para ello en primera medida, dentro del capítulo uno se realiza una descripción de las unidades de proceso que serán incluidas en la planta piloto, junto con un desarrollo conceptual de los servicios de vapor, agua de proceso y agua residual. Este capítulo se divide en cuatro subcapítulos, el primero realiza una contextualización a la situación actual del proyecto y a la planta piloto de la Fundación Universidad de América. En el segundo se describen cada una de las unidades de proceso que comprende dicha planta. En el tercero se presentan las dimensiones de las unidades explicadas anteriormente. Y en el cuarto, se realiza una descripción de los servicios a abordar.

Posteriormente en el Capítulo Dos, se lleva a cabo la determinación de los requerimientos de vapor, agua de proceso y agua residual, en función de las unidades de proceso; mediante un análisis de las especificaciones de cada una de ellas. También se presenta una consideración para la selección de tuberías. Este capítulo, como el anterior, se divide en cuatro subcapítulos. Luego en el Capítulo Tres, se determina la normatividad aplicable con relación a las tuberías, servicios industriales y lo referente a emisiones. A su vez, este capítulo se subdivide en cinco.

En seguida, se realiza una descripción de las memorias de cálculo utilizadas en el proceso de programación, que permiten la descripción de los fenómenos enmarcados a las redes de vapor, agua de proceso y agua residual de la planta piloto. Siendo este el Capítulo Cuatro y estando dividido en tres subcapítulos, uno para flujo de fluidos, el segundo para transferencia de calor y aislamiento, y el último respecto a la potencia de bombeo y presión requerida.

A continuación, en el Capítulo Cinco se describe el proceso de programación de la herramienta resultante y la esquematización de las redes para los servicios mencionados. Este es el capítulo más largo, el cual se subdivide en tres. Primero, el proceso de programación, siendo este dividido en las diferentes secciones de la

herramienta de cálculo desarrollada. Segundo, la validación de la herramienta. Tercero y último, la propuesta de distribución de redes.

Finalmente, los autores de este trabajo brindan sus conclusiones y recomendaciones con el fin de contribuir en la continuidad del proyecto de la Planta Piloto de la Fundación Universidad de América.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Realizar una propuesta del diseño esquemático de las redes de vapor, agua de proceso y agua residual de la planta piloto.

### **Objetivos específicos**

- Diagnosticar los requerimientos necesarios de vapor, agua de proceso y agua residual para las unidades de proceso de la planta piloto.
- Establecer los requerimientos y las restricciones normativas de los servicios de vapor, agua de proceso y agua residual de la planta piloto.
- Conceptualizar la distribución de redes empleando metodologías de cálculo necesarias para la descripción total de los requerimientos.
- Elaborar una estructura de cálculo programada que permita la evaluación conceptual de los servicios industriales, para la correcta implementación de las redes de vapor, agua de proceso y agua residual de la planta piloto.

## **1. SERVICIOS PARA LAS UNIDADES DE PROCESO**

Este capítulo consta de una descripción de las unidades de proceso que se implementaran en la planta piloto, teniendo en cuenta las hojas de especificaciones del fabricante. Por otra parte, también se hará una descripción de los servicios industriales requeridos para las unidades.

### **1.1 Planta Piloto Universidad de América**

La universidad es un pilar de la educación donde se instruyen los profesionales del futuro, allí se da un desarrollo de los diferentes temas académicos requeridos para lograr la titulación en cualquier área o programa deseado. La Fundación Universidad de América cumple con la misión de formar profesionales en ingeniería química cada año.

Los estudiantes de ingeniería química cuentan con un pensum académico aceptado por las entidades gubernamentales para optar por dicho título al finalizar sus estudios. En busca de aumentar el conocimiento en el ciclo de materias referentes a ingeniería aplicada se lleva a cabo un proyecto que implica la implementación de una planta química en las instalaciones de la universidad. Así, se creará un espacio físico que facilite el entendimiento de la cátedra y se puedan realizar experimentos en los diferentes procesos industriales.

La puesta en marcha de este proyecto comprende diferentes fases. En la fase inicial, en la que se encuentra, es de vital importancia contar con buenas bases técnicas. Una de estas bases es la determinación de los requerimientos en función de corrientes de servicios de vapor, agua de proceso y agua residual y las tuberías requeridas, para el correcto funcionamiento de las diferentes unidades de proceso con los que cuenta la universidad.

Las seis secciones que se plantean en función de lo adquirido por la Fundación Universidad de América son: Una etapa de reacción química, compuesta de un sistema con 4 reactores CSTR, 4 reactores PFR y un reactor Multi-tubular; este sistema trabaja con aceite térmico para el calentamiento y requiere una línea de agua de proceso. Una etapa de destilación que utiliza vapor para el reboiler y agua de proceso. Una etapa de

absorción, la cual no utiliza vapor y tiene incorporado un compresor propio, pero como es lógico, necesita una red de agua de proceso. Una etapa de extracción, que puede utilizarse para extracción sólido – líquido y líquido – líquido; utiliza aceite térmico mediante resistencias eléctricas para el calentamiento o vapor. Una etapa de secado, la cual no utiliza vapor ni agua de proceso, presenta un tanque para agregar manualmente el líquido y humidificar la corriente de aire a secar. Y una etapa de evaporación, la cual trabaja con vapor para los calentamientos sucesivos. Es de resaltar que todas las unidades requieren una línea de aire comprimido para la instrumentación que poseen, así como conexión eléctrica; pero estos dos servicios no se contemplan dentro de este proyecto de grado.

Por otra parte, cabe mencionar que este proyecto para la construcción de la planta piloto se realiza en una zona diferente y apartada de los laboratorios existentes. Por ende, será independiente de redes preexistentes.

## **1.2 Unidades de Proceso**

A continuación, se detallan las características y como se compone cada una de las 6 unidades de proceso de la planta piloto. Estas son el banco de reactores, la planta de absorción de gases, planta de destilación, planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido, secador de bandejas de flujo transversal y vertical, y el tren de evaporadores.

### **1.2.1 Banco de Reactores**

Los reactores industriales son equipos donde ocurren reacciones químicas, su funcionalidad se basa en maximizar la conversión y selectividad de la reacción química, estos pueden adaptarse a diferentes procesos químicos de acuerdo con la necesidad, se consideran como el principal equipo en cuanto a síntesis química.

En la figura 1 se puede observar una clasificación de aplicaciones industriales de acuerdo con el tipo de reactor y las fases presentes en el proceso, además de la frecuencia en la que se usan industrialmente.

**Figura 1**

*Aplicaciones industriales de reactores.*

FASES PRESENTES	MODO DE OPERACION			
	DISCONTINUO	CONTINUO		
		TUBULAR	MULTIETAPAS	AGITADO
GAS LIQUIDO	*	*** CRAQUEO VAPOR ** PRODUCCION UREA	*	*
G-L	** DISOLUCION POLIMERIZACION		** DISOLUCION POLIMERIZACION	*** ESTERIFICACION
L-L	** FERMENTACION	*** ABSORCION CO <sub>2</sub>	**OX.CICLOHEXANO	***BIOTRAT.AGUA
F-S cat.	** SULFONACION AROMATICOS	** HIDROLISIS ESTER	**POLIMERIZACION	**NITRACION AROMATICOS
F-S	** HIDROGENACION	***L.FIJO**L.MOVIL	**L.FLUIDIZADO	***L. FLUIDIZADOS
	** COMBUSTION SOLIDO	** LECHO MOVIL	** TOSTACION MENAS	** COMBUSTION EN L.FLUID.
FRECUENCIA DE USO: *** PREFERENCIAL ** A MENUDO * RARO O MUY RARO				

**Nota.** Clasificación de aplicaciones industriales de diferentes reactores según las fases presentes en el proceso y la frecuencia de uso en la industria. Tomado de: M.Iborra, J.Tejero, F.Cunill. (2013), *Reactores multifásicos*.

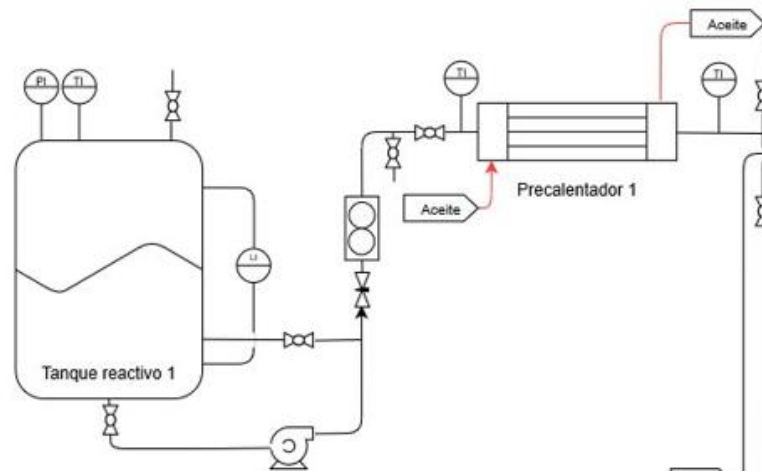
A continuación, se describirá el banco de reactores que será parte de la planta piloto.

La unidad de banco de reactores está compuesta por: un reactor de tanque agitado de 3L con velocidad regulable y chaqueta, un reactor tubular de 3L con chaqueta, un set de 3 reactores agitados de 1L c/u con chaqueta, un set de 3 reactores tubulares de 1L c/u con chaqueta, un reactor multi-tubular de 3L con coraza. El sistema cuenta con tanques de alimentación de reactantes y de acumulación de producto, sistemas de mezclado, precalentadores, sensores y controladores de variables de proceso, tablero de control y la estructura. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante. Puede ser utilizado para operar en continuo, por lotes o por lote alimentado [1].

En cuanto a los tanques de almacenamiento, constan de dos tanques cilíndricos de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 15L de reactivo. Cada uno de los tanques cuenta con bomba de carga y un precalentador para el acondicionamiento del alimento [1].

## Figura 2

*Tanque de almacenamiento de reactivo y precalentador.*

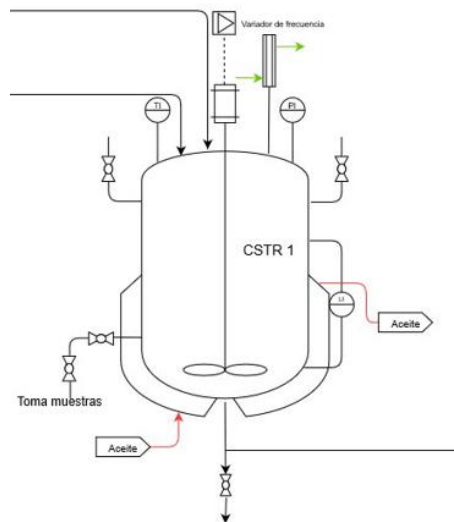


**Nota.** Tanque de almacenamiento de reactivo e intercambiador de tubos y coraza (precalentador) de la unidad de proceso banco de reactores.

Para el sistema de reactores de tanque agitado CSTR, se tiene un sistema de tanque de 3L y tres tanques en serie de 1L cada uno. Un tanque cilíndrico de fondo redondeado, construido en acero inoxidable 304. Cuenta con chaqueta de fluido de transferencia de calor, aislamiento térmico, y ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. El cuerpo del tanque tiene: línea de descarga en el fondo con válvula de bola, toma-muestras lateral con sistema antirretorno. [1] En las paredes del tanque se ubican deflectores para generar turbulencia. Además, consta de un motor eléctrico controlado por un variador de velocidad. El eje de agitación está construido en acero inoxidable y permite ubicar los impulsores a diferentes alturas dentro del tanque [1].



**Figura 3**  
*Reactor CSTR.*

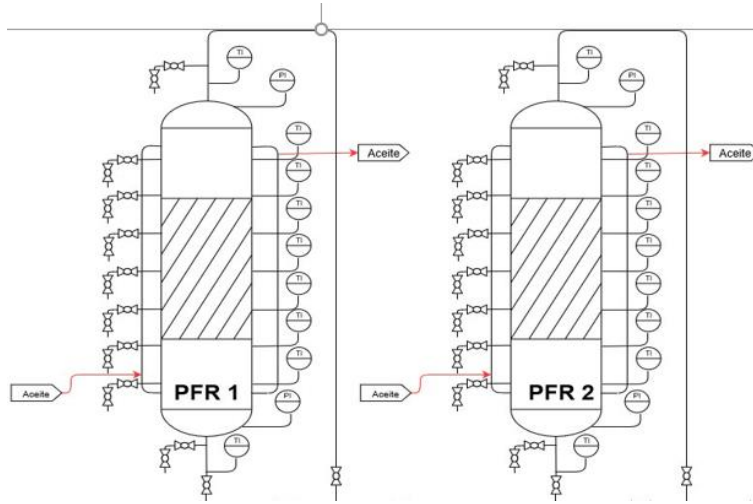


**Nota.** Reactor CSTR de 3L de la unidad de proceso banco de reactores.

En relación con el sistema de reactores tubulares PFR, este se compone de un reactor tubular de 3L y tres reactores en serie de 1L cada uno. Reactores cilíndricos de cabezal plano removible acoplado con unión tipo "clamp", para carga de catalizador y, montaje y desmontaje rápido, construido en acero inoxidable 304. La sección principal cuenta con mallas de 1/2" en la parte superior e inferior para soportar el lecho. Está compuesto por una coraza por donde circula el fluido de transferencia de calor, aislamiento térmico, y ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. A lo largo del cuerpo del reactor se encuentran instaladas toma muestras y termocuplas tipo J. En la entrada y salida del reactor se encuentran instalados dos sensores de presión. Cuenta con una válvula de acero inoxidable para descargar el sistema por gravedad [1]. El sistema de reactor multi-tubular de 3L, es un reactor cilíndrico de cabezal plano de las mismas características del PFR [1].

**Figura 4**

*Reactor tubular y reactor multi tubular.*

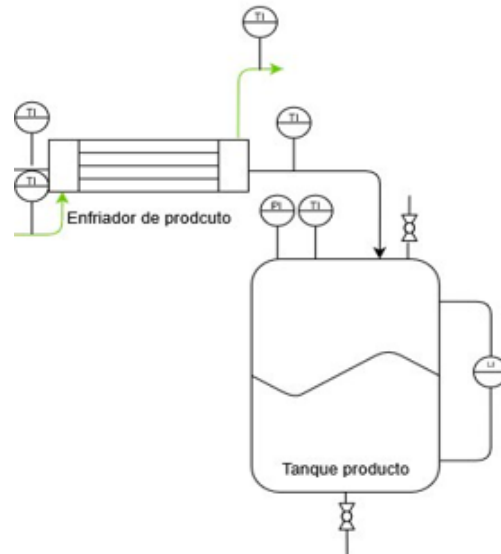


**Nota.** Reactor tubular de 3L y reactor multitubular de la unidad de proceso banco de reactores.

Además, consta de dos intercambiadores de calor y dos tanques cilíndricos de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 15L de producto cada uno. Los intercambiadores son de tubos y coraza y se usan como enfriadores del producto [1].

## Figura 5

*Tanque de almacenamiento de producto y enfriador.*



**Nota.** Tanque de almacenamiento de producto e intercambiador de tubos y coraza (enfriador) de la unidad de proceso banco de reactores.

La temperatura se registra con termocuplas tipo J. Cabe mencionar que cuenta con tablero de control, una unidad de manejo remoto de variables de proceso por PLC, pantalla HMI y módulos de control. Y su estructura modular está construida en acero y montada sobre ruedas para su fácil desplazamiento [1]. El diagrama PFD para los equipos anteriormente descritos se encuentran en el Anexo 1, figura 103 para los CSTR y en el Anexo 1 figura 104 para los PFR. Además, en el Anexo 2 se puede encontrar una tabla con especificaciones adicionales más detalladas de esta unidad.

### **1.2.2 Planta de Absorción de Gases**

La columna de absorción tiene como finalidad separar un componente de una corriente gaseosa por medio de transferencia de masa con un disolvente conocido como absorbente. Se utiliza en la industria para entregar productos con una mayor calidad o

en especificaciones de pureza eliminando un componente no deseado, para recuperar un gas de interés o para la obtención de un líquido.

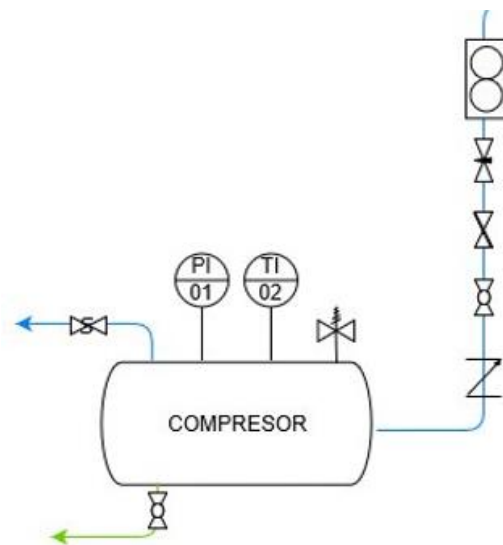
Su uso es muy amplio, desde eliminación de olores y humos hasta componentes tóxicos como dióxido de azufre, ácido clorhídrico, dióxido de carbono, ácido sulfúrico, entre otros. Dentro de los procesos industriales más comunes se encuentra el procesamiento del gas natural, producción de ácido nítrico, obtención de ácido sulfúrico y purificación de corrientes gaseosas como los gases de refinerías. [2]

La unidad de la planta piloto está compuesta por el sistema de generación de aire, el de humidificación, la columna de absorción, los tanques de acumulación del solvente, y el tablero de control. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante. Puede ser utilizado para una gran diversidad de aplicaciones de absorción de gases entre otras: absorción de CO<sub>2</sub> con solución alcalina o con aminas, compuestos orgánicos volátiles con aceite lubricante, aire contaminado con gases ácidos o alcalinos con agua, absorción con líquidos iónicos, etc. [3].

El sistema de generación de aire está compuesto por un compresor de aire a una presión mínima de 2 bar, y un flujo de 20 L/min [3].

**Figura 6**

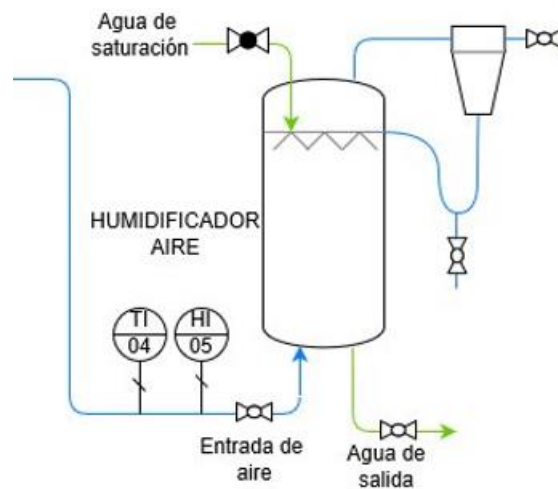
*Compresor.*



**Nota.** Compresor de aire de la unidad de proceso planta de absorción.

El sistema de humidificación está relacionado a la columna humidificadora, la cual está construida en acero inoxidable. A la salida de gas de la columna humidificadora se encuentra un ciclón para evitar gotas de arrastre y/o entradas de gotas de agua a la columna de absorción [3].

**Figura 7**  
*Humidificador de aire.*

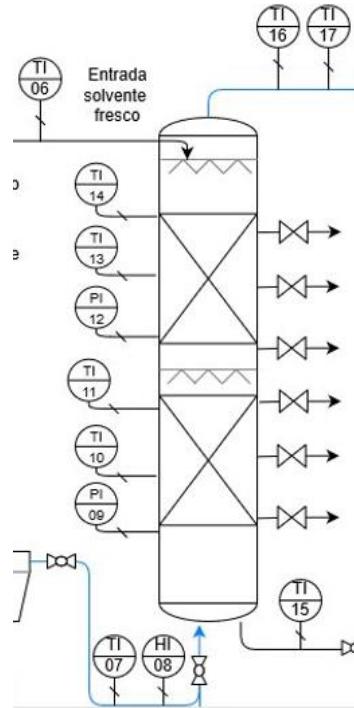


**Nota.** Humidificador de aire de la unidad de proceso planta de absorción.

La columna de absorción está construida con dos secciones principales y cuenta con cabezal superior e inferior. La altura total del sistema es de 2m, y las secciones están acopladas con unión tipo “clamp” para montaje y desmontaje rápido. Cada sección se encuentra llena de empaque al azar, de material inerte con dimensión característica de 1/4” [3].

**Figura 8**

*Torre de absorción empacada.*

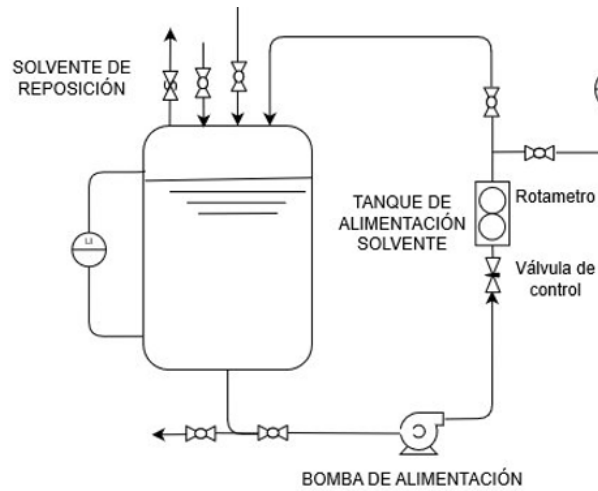


**Nota.** Torre de absorción de la unidad de proceso planta de absorción.

El sistema de almacenamiento de solvente fresco se compone de un tanque cilíndrico de acero inoxidable, con capacidad de almacenar 50L de solvente. El tanque cuenta con conexión a bomba centrífuga para recirculación y alimentación a la columna de absorción [3].

**Figura 9**

*Tanque de almacenamiento de solvente.*

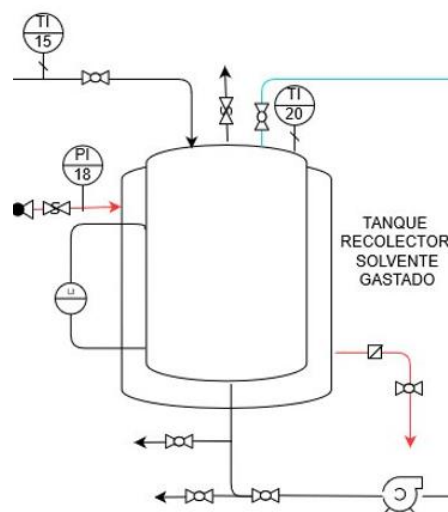


**Nota.** Tanque de almacenamiento de solvente de proceso planta de absorción.

Y para solvente gastado se tiene un tanque cilíndrico en acero inoxidable de 50L con chaqueta de calentamiento para almacenamiento de solvente gastado y regeneración del solvente [3].

**Figura 10**

*Tanque recolector de solvente gastado.*

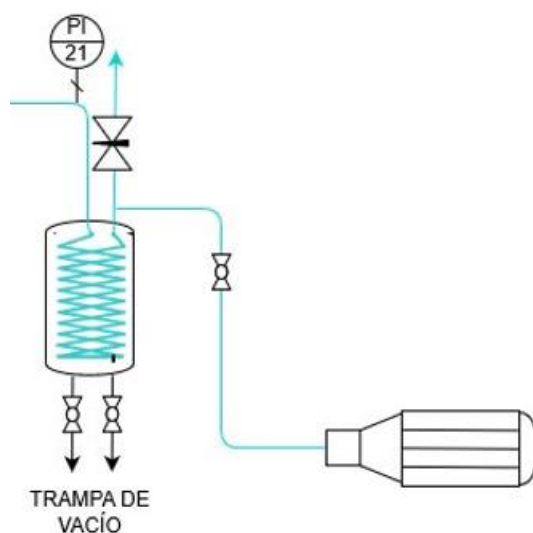


**Nota.** Tanque recolector de solvente gastado de la unidad de proceso planta de absorción.

En función del sistema de vacío, se maneja una bomba de diafragma con capacidad para remover 13L/min y una presión mínima de 0.1 bar con ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. Aguas arriba de la bomba de vacío se encuentra una trampa de vacío para remoción de gases condensables y protección de la bomba de vacío [3].

**Figura 11**

*Trampa de vacío.*



**Nota.** Trampa de vacío de la unidad de proceso planta de absorción.

Finalmente, para el tablero de control. Se tiene una unidad de manejo remoto de los indicadores de temperatura, las bombas de solvente y agua, los indicadores de presión y los higrómetros. Y estructuralmente es una estructura modular construida en acero montada sobre ruedas para su fácil desplazamiento [3]. El diagrama PFD para la unidad anteriormente descrita se puede observar en el Anexo 1 figura 105. Además, en el Anexo 2 se puede encontrar una tabla con especificaciones adicionales más detalladas de esta unidad.



### **1.2.3 Planta de Destilación**

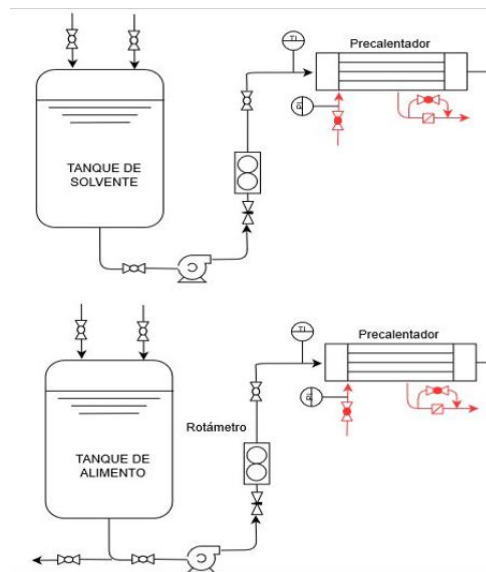
La mayoría de los procesos industriales tiene como unidades finales etapas de separación, las columnas de destilación se utilizan desde la industria petroquímica hasta la farmacéutica. Esta operación tiene un gran impacto en la composición de los productos finales, su principio se basa en la diferencia de volatilidad de los compuestos de una corriente. Se utiliza en gran medida en las refinerías petroleras, separando diversos productos tales como gas licuado, gasolina, diésel, lubricantes, etc. [4]

En la planta química de la universidad se contará con una unidad compuesta por: el sistema de alimentación, la columna de destilación, el sistema de condensación y reflujo, los tanques de acumulación de destilado, medidores, y el tablero de control. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante. Puede ser utilizado para destilación de una gran diversidad de mezclas ideales y no-ideales, en aplicación de destilación tradicional, extractiva, y azeotrópica. Igualmente se puede operar en forma de destilación simple, destilación batch con rectificación, destilación semibatch, y destilación continua [5].

El sistema de alimentación consta de dos tanques cilíndricos de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 50 L, con su respectiva bomba dosificadora de carga. Uno de los tanques corresponde a la mezcla problema y el otro se utiliza para el solvente. El flujo de alimentación se conduce por bomba a través de un intercambiador de calor de tubos y coraza construido en acero inoxidable 304. El intercambiador cuenta con sensores de temperatura a la entrada y salida del flujo de proceso[5].

**Figura 12**

*Tanques de almacenamiento de solvente y alimento.*

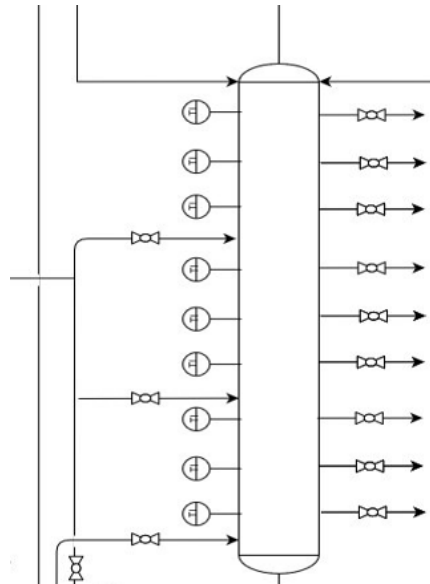


**Nota.** Tanques de almacenamiento de solvente, alimento e intercambiadores de calor (precalentadores) de la unidad de proceso planta de destilación.

La columna está construida con 3 secciones principales de 1m de altura y 4" de diámetro, con posibilidad de alimentación en cada una, y dos cabezales (uno superior y otro inferior). La altura total del sistema, incluyendo soportes, tanques, estructura y condensador es de 6 m aproximadamente [5]. La sección inferior de la columna cuenta con una entrada de vapor, y una salida por la parte inferior con válvula para descarga y purga de la columna. La sección superior de la columna cuenta con una salida de vapor, y una entrada de retorno de reflujo con válvula de acero inoxidable [5].

**Figura 13**

*Columna de destilación.*

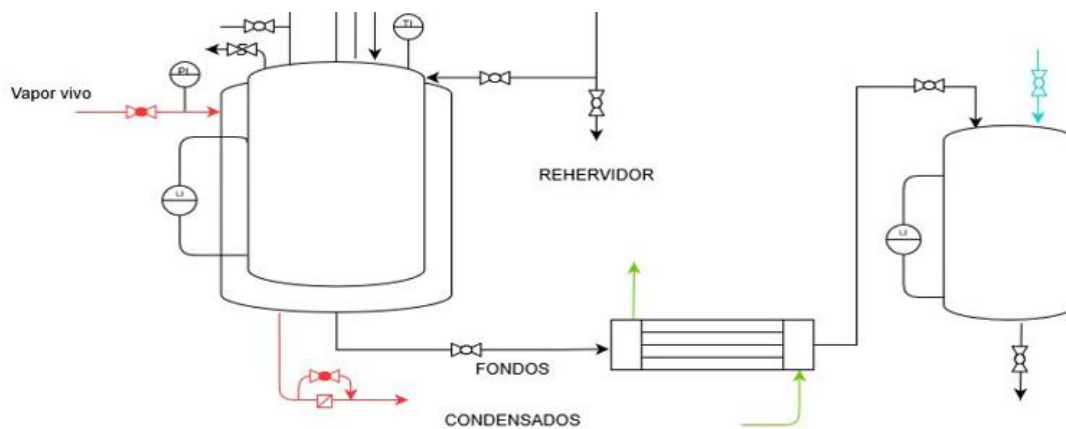


**Nota.** columna de destilación de la unidad de proceso planta de destilación fraccionada.

El rehervidor es un contenedor de acero inoxidable con área de intercambio de calor sumergida y aislamiento térmico. El producto de fondos se envía a través de un enfriador y se almacena en un tanque colector [5].

**Figura 14**

*Rehervidor y tanque de almacenamiento de producto de fondos.*

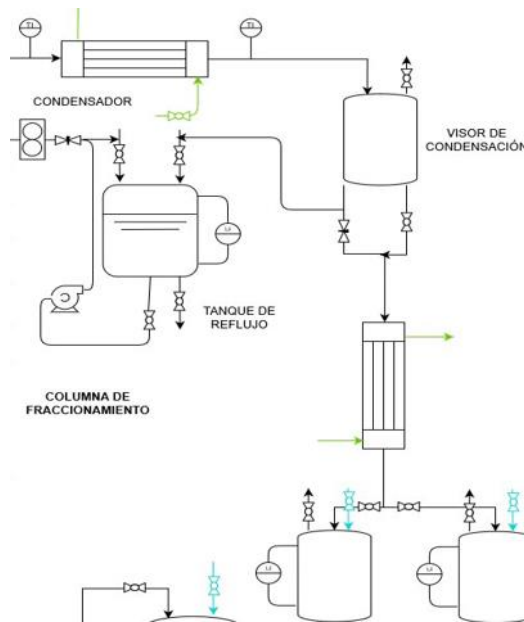


**Nota.** Rehervidor, intercambiador de calor y tanque de almacenamiento de producto de fondos de la unidad de proceso planta de destilación.

El sistema de condensación y reflujo consta de un intercambiador de coraza y tubos que hace las veces de condensador, un visor de condensación, un tanque de acumulación de reflujo con su respectiva bomba, y dos tanques cilíndricos simétricos a modo de colectores. El visor de condensación es un tanque con un arreglo de válvulas para entrada de condensado, conexión atmosférica, salida a tanque de reflujo, salida para destilados, y posibilidad de hacer separación de fases líquidas[5]. El destilado se envía a un enfriador y se almacena en dos tanques colectores de igual capacidad [5].

**Figura 15**

*Condensador y tanque de almacenamiento de producto de cimas.*



**Nota.** condensador, intercambiador de calor y tanque de almacenamiento de producto de cimas de la unidad de proceso planta de destilación.

En cuanto al tablero de control, se tiene un sistema que cuenta con regulación manual de los flujos de alimentación, de reflujo y de vapor (en el caso de contar con vapor de caldera) por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros para líquidos previamente calibrados. En cuanto a su estructura es modular construida en acero inoxidable, con escalera lateral para acceso a los diferentes puntos del equipo[5].

El diagrama PFD para la unidad anteriormente descrita se puede observar en el Anexo 1 figura 106. Además, en el Anexo 2 se puede encontrar una tabla con especificaciones adicionales más detalladas de esta unidad.

#### **1.2.4 Planta de Extracción Sólido-Líquido y Líquido-Líquido**

El proceso de extracción líquido-líquido se basa en el punto de solubilidad de los componentes. Cuenta con la alimentación, que es el medio donde se encuentra el componente de interés y un disolvente. Es ampliamente utilizado en separación de compuestos que tienen volatilidades cercanas, productos que forman azeótropos, productos sensibles a temperatura, entre otros. Se usa comúnmente en la obtención de compuestos aromáticos, extracción de metales como el cobre presente en soluciones amoniacales, vitaminas o antibióticos [6].

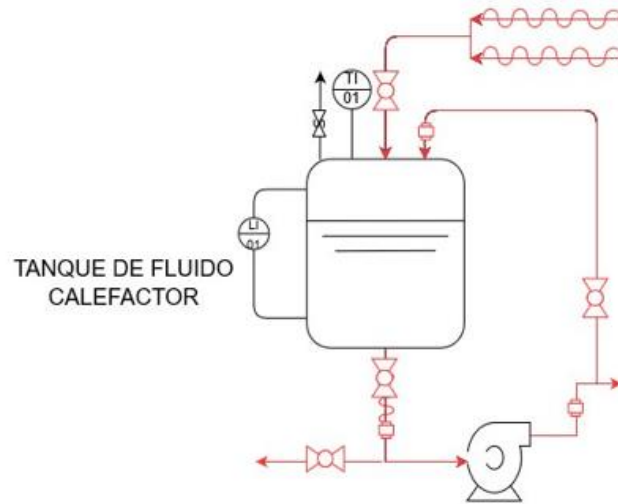
Por otra parte, la extracción sólido-líquido, cuenta con una matriz en estado sólido donde se encuentra el compuesto de interés, que por medio de un disolvente será extraído. Las aplicaciones industriales son muy variadas. Por ejemplo, se utiliza en la extracción de azúcar de la caña de azúcar, diferentes aceites provenientes de semillas como las de girasol, producción de almidón, etc. [7]

La planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido que se implementará en la universidad, está compuesta por el sistema de calentamiento, el sistema de extracción, el condensador, el sistema de concentración del extracto, los tanques colectores de solvente, el sistema de vacío, y el tablero de control. El equipo permite realizar el proceso de extracción, la concentración del extracto y la recuperación del solvente, tanto en operación por lotes como en continuo. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante [8].

El sistema de calefacción está compuesto por un Tanque en acero inoxidable con capacidad de 50L aislado con fibra de vidrio. El fluido calefactor es un aceite térmico que se calienta por acción de 3 resistencias de inmersión fabricadas en acero inoxidable. El fluido se hace circular por la chaqueta del extractor o del tanque de concentración de extracto. También puede utilizarse vapor para el calentamiento anteriormente mencionado [8].

## Figura 16

*Tanque de fluido calefactor.*

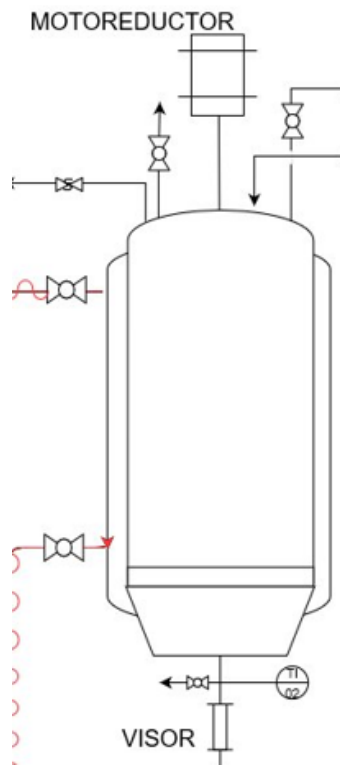


**Nota.** Tanque de fluido calefactor de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

El percolador agitado es un tanque cónico truncado de acero inoxidable 304 con capacidad de 20 L aislado con fibra de vidrio. El tanque cuenta con chaqueta de calentamiento por donde circula el aceite térmico o vapor. El tanque cuenta con un sistema de pivote con tres posiciones para facilitar la descarga de sólidos. En la parte inferior cuenta con una línea de purga acoplada a un visor con válvula para regular la decantación, conexión de termocupla y válvula para toma de muestras[8]. El percolador cuenta con un agitador de cintas helicoidales y un agitador de doble paleta, ambos de acero inoxidable, además de su motor [8].

## Figura 17

*Percolador.*

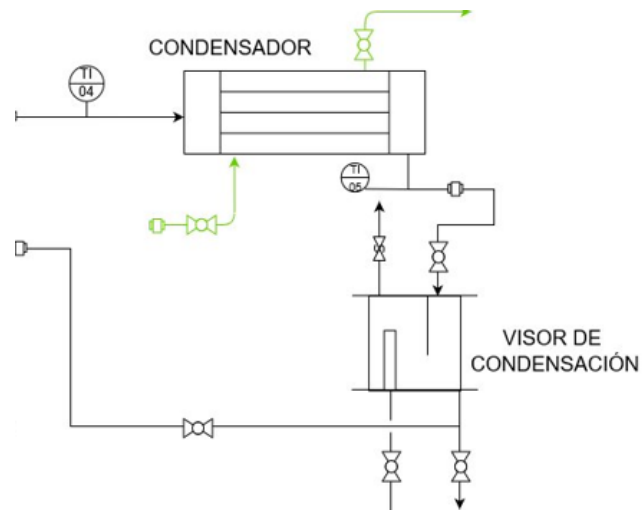


**Nota.** Percolador de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

El condensador es un Intercambiador de coraza y tubos, construidos en acero inoxidable 304. Opera con fluido de refrigeración por la coraza. En la parte inferior tiene conexión de recirculación al percolador, toma de muestras y conexión hacia los tanques colectores[8].

## Figura 18

### Condensador.



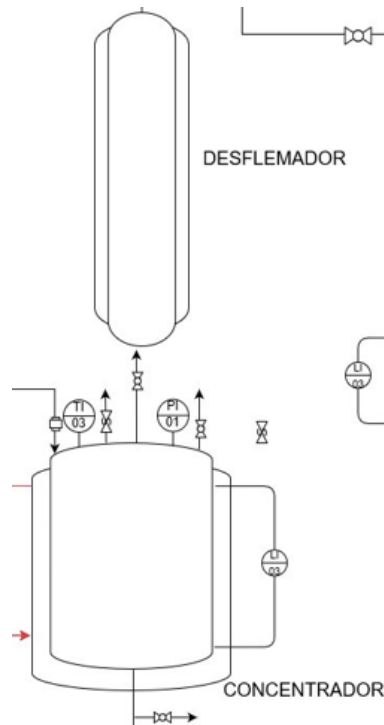
**Nota.** condensador (intercambiador de calor de tubos y coraza) de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

El concentrador es un tanque en acero inoxidable con capacidad de 20 L aislado con fibra de vidrio. El tanque cuenta con chaqueta de calentamiento por donde circula el aceite térmico o vapor. El concentrador cuenta con un desflemador para prevenir la formación de espuma[8].



**Figura 19**

*Tanque concentrador y desflemador.*

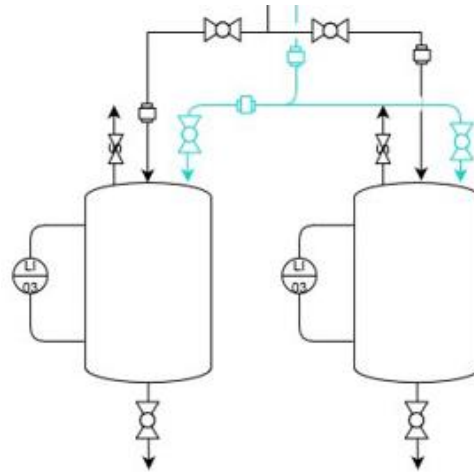


**Nota.** Tanque concentrador y desflemador de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

Los tanques colectores de solvente son tanques cilíndricos simétricos de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 10 L [8].

**Figura 20**

*Colectores de solvente.*



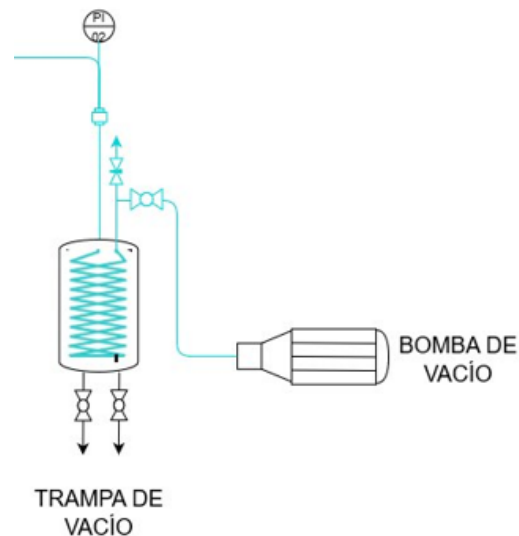
COLECTORES DE  
SOLVENTE

**Nota.** Tanque colector de solvente de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

Posee una trampa de vacío, la cual está compuesta por un tanque cilíndrico en acero inoxidable con serpentín interno que actúa como trampa fría para remoción de gases condensables y protección de la bomba de vacío. El sistema cuenta con una bomba de vacío[8].

**Figura 21**

*Trampa de vacío.*



**Nota.** Trampa de vacío de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

El tablero de control es una unidad de manejo y encendido de los indicadores de temperatura, el control de temperatura del aceite térmico, la bomba de recirculación de fluido de calefactor, las resistencias del fluido calefactor, la bomba de vacío y el sistema de encendido del motor de agitación y variador de velocidad. El diagrama PFD para la unidad anteriormente descrita se puede observar en el Anexo 1 figura 108. Además, en el Anexo 2 se puede encontrar una tabla con especificaciones adicionales más detalladas de esta unidad.

### **1.2.5 Secador de Bandejas**

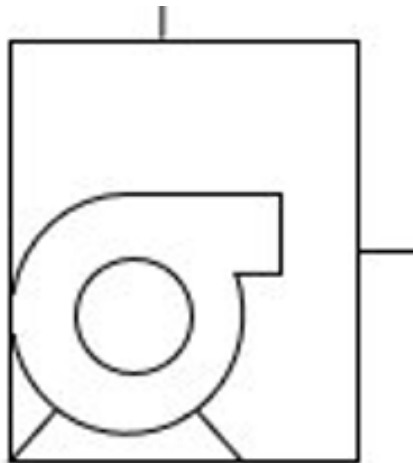
El secador de bandejas se utiliza para eliminar la mayor cantidad de humedad presente en un sólido, por medio de transferencia de calor y materia, el agua presente se va evaporando, formando parte de la corriente de aire a medida que transcurre el proceso. Se utiliza generalmente en el secado de alimentos o deshidratación de estos, es una técnica usada para la conservación de alimentos [9].

La unidad está compuesta por una cámara de secado con un sistema de bandejas construido en acero inoxidable 304, un ventilador de velocidad variable, un sistema de adecuación de humedad del aire, un conjunto de resistencias para el calentamiento del aire, y un sistema de ductos con recirculación. El equipo es robusto, durable, y recubierto con aislamiento térmico. Este puede ser empleado para el secado de una gran variedad de productos, entre los que se puede mencionar alimentos, minerales, biomasa, etc.[10]

El sistema de secado cuenta con un ventilador centrífugo capaz de proveer 500 pies cúbicos de aire por minuto con una presión estática de 1 pulgada de columna de agua [10]. El sistema de toma de aire cuenta con un filtro para prevenir la contaminación por partículas o microorganismos [10].

### **Figura 22**

*Ventilador.*

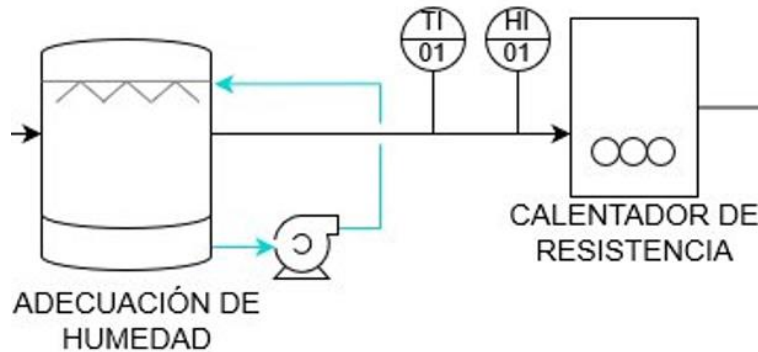


**Nota.** Ventilador de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

Así mismo, el equipo cuenta con un reservorio de agua el cual se encuentra ubicado previo a las resistencias de calentamiento. El reservorio alimenta una bomba que lleva el agua a un sistema de aspersion ubicado en la parte superior del reservorio sobre la línea de entrada de aire. Los aspersores permiten controlar la humedad del aire de entrada al proceso de secado. El aire es calentado empleando un sistema de resistencias capaz de proveer una potencia máxima de 6.75 KW [10].

### Figura 23

*Adecuación de humedad y calentador de resistencia.*



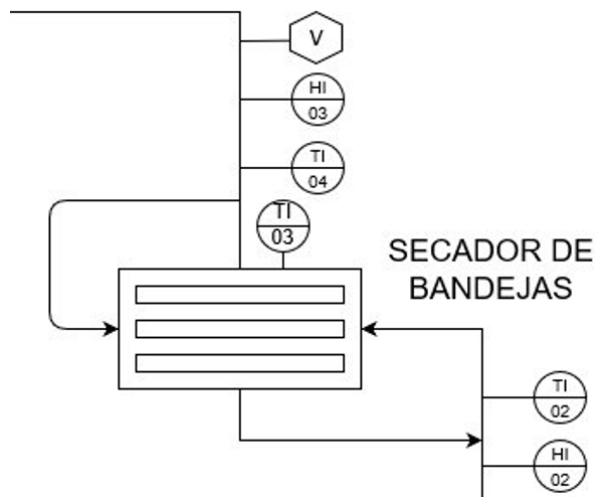
**Nota.** Adecuación de humedad y calentador de resistencias de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

La cámara de secado de 40 cm de longitud por 40 cm de alto y 40 cm de ancho, está construida en SS 304, con aislamiento interno. La puerta frontal de la cámara cuenta con un vidrio para el seguimiento visual del proceso. Al interior del secador se encuentra un sistema de 3 bandejas cuadradas removibles de 30 cm de lado. Estas están ubicadas sobre un soporte acoplado a una balanza electrónica con rango de medida de 0-10000 g y resolución de 1g [10].

El equipo cuenta con ductos de aire en las paredes superior e inferior, y en las paredes laterales de la cámara, los dampers son accionados de forma manual. Así mismo, cuenta con sensor de temperatura y humedad para el aire ambiente, para el flujo de aire alimentado a la cámara, y para el aire a la salida de la cámara de secado. El sistema cuenta con un anemómetro ubicado sobre el ducto de salida, para la medición de la velocidad del aire[10].

**Figura 24**

*Secador de bandejas.*



**Nota.** Secador de bandejas de la unidad de proceso planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

El tablero de control está conformado por una unidad de manejo de encendido de los indicadores de temperatura y humedad, sistema de encendido de las resistencias, encendido de la bomba de agua, encendido del ventilador, y control variador de velocidad [10]. El diagrama PFD para la unidad anteriormente descrita se puede observar en el Anexo 1 figura 109. Además, en el Anexo 2 se puede encontrar una tabla con especificaciones adicionales más detalladas de esta unidad.

### **1.2.6 Tren de Evaporación**

Este equipo se conoce comúnmente como un concentrador, se usa para eliminar de un líquido el contenido de agua presente dando como resultado final un líquido con alto contenido de sólidos totales. Esta unidad se utiliza en los procesos de fabricación de jarabes, concentración de azúcar de remolacha o jugos concentrados. [11]

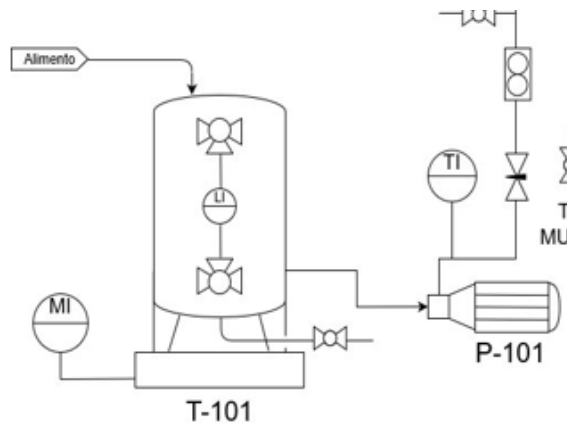
La unidad está compuesta por el sistema de almacenamiento del alimento a evaporar, así como de tanques para la recolección de condensado y del producto concentrado. Cuenta con dos unidades de evaporación con sistema de calefacción diferente (chaqueta y calandria), para ser utilizados en efecto simple o múltiple, con

alimentación en paralelo o contracorriente, y con circulación forzada o natural. El equipo cuenta con un condensador de vapor, y sistemas de recolección de condensados, y tablero de control. El equipo es robusto, durable, construido en acero inoxidable 304 con acabado brillante [11].

El sistema de alimentación consta de un tanque cilíndrico de acero inoxidable, con capacidad para almacenar 40 L de mezcla de trabajo, y con su respectiva bomba de carga [12].

**Figura 25**

*Tanque de alimentación.*

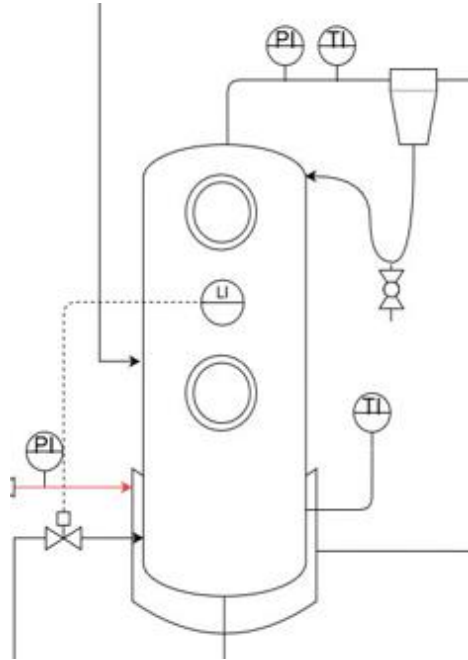


**Nota.** Tanque de alimentación de la unidad de proceso del tren de evaporadores.

El evaporador de chaqueta está constituido por dos secciones en acero inoxidable 304 con aislamiento. La sección enchaquetada utiliza vapor como fluido de calentamiento. La sección superior, correspondiente a la cámara de separación tiene una altura total de 1.0 m [12].

## Figura 26

*Evaporador de chaqueta.*



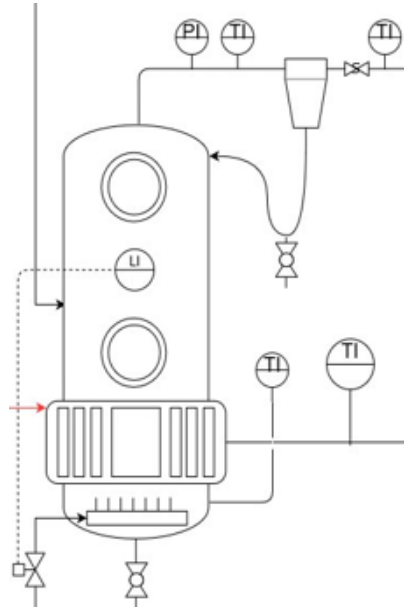
**Nota.** Evaporador de chaqueta de la unidad de proceso del tren de evaporadores.

El evaporador de calandria o de tubos verticales está constituido, por la sección de transferencia de calor, un cabezal inferior y la cámara de separación. La sección de transferencia de calor consiste en una serie de tubos y un conducto de retorno central. La cámara de separación tiene 0.6 m de altura, para una altura total de 1.0 m. Todas las secciones aisladas con fibra de vidrio [12].



**Figura 27**

*Evaporador de calandria.*

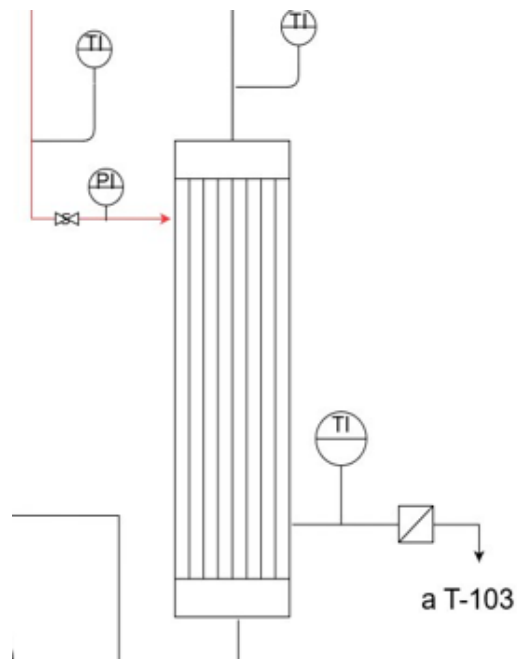


**Nota.** Evaporador de calandria de la unidad de proceso del tren de evaporadores.

El evaporador de circulación forzada consiste en un intercambiador de tubos y coraza vertical construido en acero inoxidable 304, que utiliza vapor como fluido de calentamiento. El licor se bombea a través del equipo, el cual cuenta con un área equivalente a la de las otras cámaras de evaporación[12].

### Figura 28

*Evaporador de circulación forzada.*

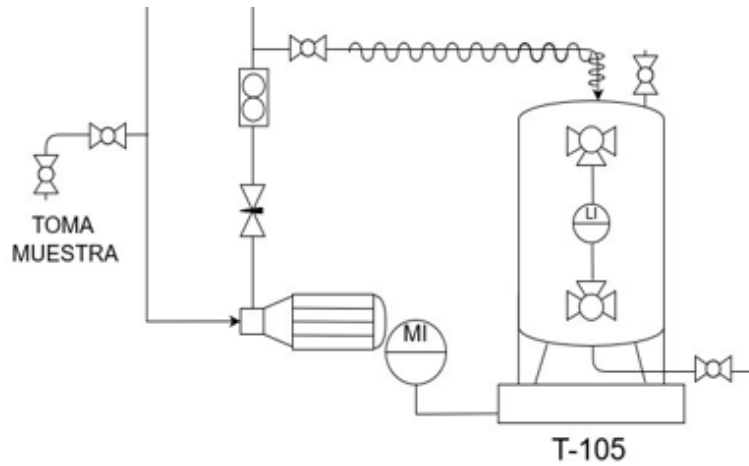


**Nota.** Evaporador de circulación forzada de la unidad de proceso del tren de evaporadores.

Para el almacenamiento de producto se tiene un tanque cilíndrico de acero inoxidable 304, con capacidad para almacenar 40 L de mezcla de trabajo. El tanque cuenta con ménsulas de soporte a la estructura y está montado sobre una balanza. El tanque tiene conexión para ser alimentado desde cada uno de los evaporadores y el sistema de circulación forzada [12].

**Figura 29**

*Tanque de almacenamiento de producto.*

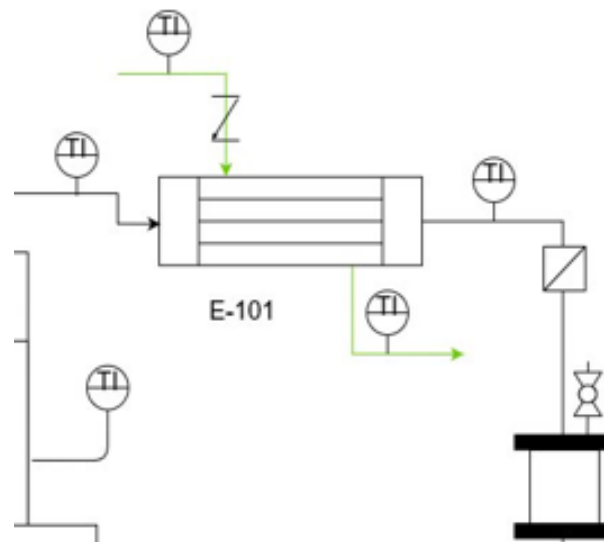


**Nota.** Tanque de almacenamiento de producto de la unidad de proceso del tren de evaporadores.

La condensación del vapor generado en el último efecto se hace a través de un intercambiador de tubos y coraza. La línea cuenta con un visor de condensación y un tanque de recolección. El tanque de recolección de dicho condensado tiene una capacidad de 27 L [12].

**Figura 30**

*Condensador.*



**Nota.** Intercambiador de calor para la condensación de vapores de la unidad de proceso del tren de evaporadores.

El sistema permite regulación manual de flujos de líquidos por medio del uso de válvulas de globo, rotámetros previamente calibrados y balanzas [12].

Por tablero de control se cuenta con una unidad de manejo remoto de los indicadores de temperatura, las bombas de alimentación y los indicadores de presión. Y es de resaltar que la estructura modular está construida en acero[12]. El diagrama PFD para la unidad anteriormente descrita se puede observar en el Anexo 1 figura 107. Además, en el Anexo 2 se puede encontrar una tabla con especificaciones adicionales más detalladas de esta unidad.

### 1.3 Dimensiones

Mediante la revisión y análisis de los planos para cada una de las unidades de proceso, se recopilan las dimensiones y son presentadas en la tabla 1.

**Tabla 1***Dimensiones de las unidades de proceso.*

<b>Equipo</b>	<b>Altura(m)</b>	<b>Area(m<sup>2</sup>)</b>	<b>Largo(m)</b>	<b>Ancho(m)</b>
<b>Banco de Reactores</b>	2.11	1.27	2.27	0.56
<b>Columna Absorción</b>	3.07	1.86	2.00	0.93
<b>Columna Destilación</b>	5.09	2.06	1.94	1.06
<b>Extractor SL/LL</b>	1.98	1.11	2.65	0.42
<b>Secador</b>	1.70	0.78	1.30	0.60
<b>Tren Evaporación</b>	2.85	3.55	2.17	1.63

**Nota.** Descripción de las dimensiones (altura, área, largo y ancho) de cada una de las unidades de proceso de la planta piloto en metros. Tomado de: "Banco de reactores - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Planta de absorción de gases - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Planta de destilación continua - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Planta de extracción sólido líquido y líquido-líquido - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Secador de bandejas - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2016. "Tren de evaporación - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2016.

Es de tener en cuenta que, para el diseño y disposición en planta de los equipos, estos deben tener un espacio de seguridad tanto de altura como de área. Este factor de seguridad es recomendación del fabricante, mediante el análisis de riesgos que el determina para cada unidad. Por tanto, con ese factor de seguridad en las medidas, un espacio para la manipulación segura de los equipos y además una estructura metálica de soporte con escaleras para acceder a las zonas más altas de estos, se plantean las siguientes dimensiones:

**Tabla 2**

*Dimensiones de las unidades de proceso con el factor de seguridad.*

<b>Descripción</b>	<b>Largo (mm)</b>	<b>Profundidad (mm)</b>	<b>Alto (mm)</b>
Columna de destilación	3460	2710	6700
Tren de evaporadores	2000	2500	3000
Banco de reactores	2500	1500	3100
Secador de bandejas	1700	1000	2700
Torre de absorción	2450	1800	4550
Planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido	2650	650	3000

**Nota.** Descripción de las dimensiones (altura, área, largo y ancho) de cada una de las unidades de proceso de la planta piloto en metros teniendo en cuenta un factor de seguridad de dimensionamiento. Tomado de: "Banco de reactores - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Planta de absorción de gases - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Planta de destilación continua - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Planta de extracción sólido líquido y líquido-líquido - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018, "Secador de bandejas - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2016. "Tren de evaporación - Guía Técnica", Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2016.

Aparte de las unidades de proceso de la planta piloto para ingeniería química, se tiene en cuenta la planta térmica que pertenece al programa de ingeniería mecánica cuya finalidad es generar vapor como servicio de la planta química. La planta térmica cuenta con las siguientes dimensiones: 1.5 m de ancho, 8.5 m de largo y 2.5 m de alto. Este equipo no se tuvo en cuenta dentro de la descripción de las unidades ya que no hace parte de este subproyecto enfocado al departamento de ingeniería química.

#### **1.4 Servicios Industriales**

A continuación, se detallan las características y como se compone cada una de las 6 unidades de proceso de la planta piloto. Estas son el banco de reactores, la planta de absorción de gases, planta de destilación, planta de extracción sólido-líquido y

líquido-líquido, secador de bandejas de flujo transversal y vertical y el tren de evaporadores.

#### **1.4.1 Agua de Proceso**

Dentro del término "Aguas de proceso" se engloban aguas de calderas, agua de refrigeración, para intercambiadores de calor y motores, disolución de productos químicos, etc. Normalmente tiene una conductividad de entre 0.1 y 50 uS/cm, y la dureza es muy baja para poder evitar la formación de depósitos en los equipos de intercambio de calor. Se deben eliminar tanto el oxígeno como de dióxido de carbono ya que provocan corrosión. Los requerimientos de la calidad del agua varían dependiendo de cuál sea el uso en concreto [13].

Así mismo, la red de agua de procesos consta de tuberías, válvulas, accesorios, bombas y asociados que componen los sistemas de transporte de agua. Estos sistemas pueden usarse para transportar agua dulce o agua no potable a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas [14].

Además, se tiene en cuenta dentro de la red de agua de proceso la red contra incendios. Ahí se utilizan para transportar sustancias extintoras, como el agua, desde el punto de suministro hasta los lugares donde se utilizan para combatir el fuego y para proporcionar protección contra incendios [14].

En el caso particular de la planta piloto de la Fundación Universidad de América, el agua de proceso será obtenida directamente del acueducto. No se cuenta con una torre de enfriamiento, ni con un sistema de acondicionamiento previo.

#### **1.4.2 Agua Residual**

Las redes de tuberías de aguas residuales transportan desechos y productos de desecho residenciales, comerciales e industriales, utilizando agua como medio de transporte, para su tratamiento y eliminación. Los sistemas de tuberías de aguas pluviales, por otro lado, llevan las aguas pluviales y las aguas capturadas en cuencas y estanques a los puntos de descarga. Estos también se conocen como sistemas de

alcantarillado pluvial. En algunas instalaciones, se utiliza un solo sistema de tuberías para transportar tanto las aguas residuales como las aguas pluviales a las áreas de tratamiento y eliminación [14].

Específicamente para la planta piloto de la universidad, no será parte de la red existente; es decir que no es una extensión de un sistema anterior. Por lo cual no hay contaminación cruzada o problemas debido a las condiciones de las tuberías previas. Como es un trabajo y una estructura totalmente nueva, se asegura que todo material cumpla con la normatividad aplicable.

### **1.4.3 Vapor**

Las redes de vapor se utilizan en muchas aplicaciones industriales para crear la presión y la energía necesarias para impulsar las máquinas y otros equipos, así como para transportar el vapor condensado al inicio del proceso. El vapor se utiliza para calentar y convertir la energía del agua en un uso beneficioso en las industrias. El vapor generalmente se transporta a través de sistemas de tuberías y se distribuye a varios lugares con un ruido mínimo y en ausencia de aire. Cualquier aire presente en un sistema de tuberías de vapor debe eliminarse rápidamente o el sistema se volverá ineficaz [14].

Actualmente se utilizan varios tipos de redes de vapor. Se pueden clasificar como redes de distribución de vapor, redes de vapor subterráneas, plantas de energía de combustibles fósiles y plantas de energía de combustible nuclear. Las redes de distribución de vapor consisten en sistemas de distribución de líneas troncales y sistemas de redes de distribución principales y alimentadores. Las tuberías subterráneas consisten en tuberías que se utilizan en la industria de calefacción urbana, donde las tuberías de vapor se utilizan para transportar vapor de proceso. En las centrales eléctricas de combustibles fósiles se suministra vapor sobrecalentado a las turbinas y para los servicios auxiliares. En las centrales nucleares, el vapor se suministra desde la caldera a la central eléctrica para varios servicios dentro de la central eléctrica [14].

Como es lógico, para la planta piloto de la Fundación Universidad de América se diseña una red de distribución de vapor. El cual para este caso será vapor de baja, con



una presión de 3 bares o menos. El vapor se generará mediante una caldera, que hace parte del departamento de Ingeniería Mecánica.

## 2. REQUERIMIENTOS

En este capítulo se realizó la determinación de los requerimientos de agua de proceso, agua residual y vapor para las seis unidades de proceso de la planta piloto. De acuerdo con la información proporcionada por las hojas de especificaciones de las unidades entregadas por el fabricante.

### 2.1 Agua de Proceso

En función de determinar la cantidad de agua de proceso necesaria para el correcto funcionamiento de las unidades de proceso de la planta piloto, se lleva a cabo un análisis del requerimiento mínimo de cada equipo. Tomando en consideración un factor de seguridad del 30%, se determinó el caudal mínimo de agua total que debe estar disponible. Factor utilizado en función de lo expresado en el libro “CHEMICAL ENGINEERING DESIGN, Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design” de Towler y Sinnott [15]; y en varios artículos como el de Andrew Henderson, titulado “A fresh approach to systems design that delivers leaner and greener buildings”[16]

El banco de reactores necesita agua de proceso para refrigeración, ya que cuenta con intercambiadores de calor de tubos y coraza. El flujo mínimo para estos es de 1 m<sup>3</sup>/h a una presión de 2 bar.

Respecto a la columna de absorción el agua de proceso se utiliza en la humidificación de la corriente de entrada, donde requiere un flujo mínimo de 30 L/min de agua, que corresponde a 1.8 m<sup>3</sup>/h.

En la columna de destilación es necesario un flujo mínimo de 1 m<sup>3</sup>/h de agua de proceso, con el fin de servir como fluido de enfriamiento en el intercambiador de calor, el cual actúa como el condensador de la columna.

El extractor sólido – líquido y líquido – líquido, precisa de un flujo de 30 L/min de agua de proceso, este flujo equivale a 1.8 m<sup>3</sup>/h.

Debido a que el secador de bandejas utiliza un reservorio de agua que se carga manualmente, no requiere agua de proceso como fluido de servicio. Y finalmente el tren

de evaporadores demanda un flujo mínimo de 1 m<sup>3</sup>/h de agua de proceso como fluido refrigerante en sus intercambiadores de calor.

Teniendo en cuenta el factor de seguridad del 30%, se suman la totalidad de las unidades de proceso y se determina el requerimiento total de agua de proceso[15]. El compilado de la información se muestra en la figura 31.

**Figura 31**

*Requerimiento de flujo total de agua de proceso.*

Equipo	Flujo Agua (m <sup>3</sup> /h)	Flujo Agua con FS (m <sup>3</sup> /h)
<b>Banco de Reactores</b>	1	1.3
<b>Columna Absorción</b>	1.8	2.34
<b>Columna Destilación</b>	1	1.3
<b>Extractor SL/LL</b>	1.8	2.34
<b>Secador</b>	0	0
<b>Tren Evaporación</b>	1	1.3
<b>Total</b>	6.6	8.58

**Nota.** Flujo total requerido de agua de proceso para el correcto funcionamiento de las unidades de proceso de la planta piloto. FS corresponde al factor de seguridad.

Por lo tanto, el flujo mínimo que debe estar disponible para el correcto funcionamiento de los 6 equipos y como tal de la planta piloto, es de 8.58 m<sup>3</sup>/h, equivalente a 143 L/min de agua.

## 2.2 Agua de Residual

Para la red de agua residual, es necesario determinar el máximo flujo de desagüe existente. Esto se calculó asumiendo una situación donde los equipos descargan al mismo tiempo el volumen lleno de todos, tanto equipos como tanques y demás contenedores de cada una de las unidades de proceso.

Por tanto, el volumen máximo de agua residual posible será igual al volumen lleno de los equipos, lo que corresponde a la sumatoria del volumen lleno de todas las unidades.

**Figura 32**

*Volumen de agua residual de los equipos de las unidades de proceso.*

Equipo	Volumen (L)	Cantidad	Total (L)
<b>Banco de reactores</b>			
Reactor CSTR	3	1	3
Reactor CSTR	1	3	3
Reactor PFR	3	1	3
Reactor PFR	1	3	3
Multi-tubular	3	1	3
Tanque alimentación	15	2	30
Tanque producto	15	2	30
<b>Columna de absorción</b>			
Tanque de solvente fresco	50	1	50
Tanque de solvente gastado	50	1	50
<b>Columna de destilación</b>			
Tanque alimentación	50	2	100
Colector	33	3	100
<b>Extractor sólido-líquido y líquido-líquido</b>			
Tanque calefactor	50	1	50
Precolador	20	1	20
Visor de condensación	1	1	1
Concentrador	20	1	20
Colector de solvente	10	2	20
<b>Tren de evaporación</b>			
Tanque alimentación	40	1	40
Tanque producto	40	1	40
Condensador	27	1	27
Visor de condensación	1	1	1
<b>Total equipo</b>			<b>594</b>

**Nota.** Descripción de la cantidad de volumen de agua residual que ocupan los equipos en las unidades de proceso.

Ahora se cuantifica el caudal de salida del fluido en cada unidad, ya que este depende de las características del proceso.

Tomando en consideración las especificaciones y planos de los equipos se identifica que el diámetro de la boquilla, que da salida a los fluidos para el desagüe en todas las unidades de proceso, es de 1 pulgada de diámetro, es decir 0.0127m de radio.

Es necesario determinar la velocidad con la que sale el fluido por esa boquilla. Para esto, se utiliza la abreviación de la ecuación de Bernoulli, desarrollada por Torricelli. Que se muestra a continuación:

Ecuación 1. Torricelli

$$v = \sqrt{2gh}$$

Para determinar esa altura de fluido, se revisó la altura de los tanques en relación con la salida del fluido en los planos de las unidades de proceso. Siendo para el banco de reactores una altura de 1.71 m, para la columna de absorción de 1.136 m, para la columna de destilación 4.45 m, para el extractor sólido-líquido y líquido-líquido de 1.57 m, para el secador no aplica debido a que ningún tanque interno acumula fluido líquido y para el tren de evaporación de 1.98 m.

Posterior al cálculo de la velocidad, se determinó el caudal de salida mediante la multiplicación del área transversal por la velocidad. Área dada por el diámetro de la boquilla. Y finalmente, sumando todos los caudales, se obtiene la tasa a la cual sale el fluido de las unidades de proceso a las condiciones planteadas. Siendo ese valor de 16 L/s. la figura a continuación muestra los resultados de la secuencia antes explicada.

### Figura 33

*Cálculo del caudal total de acuerdo con las diferentes unidades de proceso.*

Equipo	Volumen lleno (L)	Nivel de fluido (m)	Velocidad de salida (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)	Caudal (L/s)
Banco de Reactores	75	1.71	5.79	2.93E-03	2.93
Columna Absorción	100	1.14	4.72	2.39E-03	2.39
Columna Destilación	200	4.45	9.34	4.73E-03	4.73
Extractor SL/LL	111	1.57	5.55	2.81E-03	2.81
Secador	0	0.00	0.00	0	0.00
Tren Evaporación	108	1.98	6.23	3.16E-03	3.16
<b>Suma</b>	<b>594</b>				<b>16.03</b>

Gravedad	9.81	m/s <sup>2</sup>
Diámetro de boquilla	1	in
Radio de boquilla	0.0127	m

Diámetro del sifon o conducto	15	cm
-------------------------------	----	----

**Nota.** Muestra de resultados obtenidos a partir del proceso descrito para la determinación total del caudal de agua residual para las unidades de la planta piloto.

Donde:

Volumen lleno: volumen total de fluido presente en los equipos, considerando que la capacidad de los tanques está llena.

Nivel de fluido: Altura a la que se encuentra el fluido respecto a la boquilla de desagüe del equipo, se determinó por medio de los planos de cada uno.

Velocidad de salida: Velocidad con la que sale el fluido por la boquilla de desagüe, para todos los equipos es de 1 pulgada de diámetro.

Caudal: Flujo con el que sale el fluido de los equipos.

La determinación del caudal total de agua residual se realizó con la finalidad de diseñar el sifón de desagüe y el cárcamo que dé cumplimiento a la normatividad.

### **2.3 Vapor**

Para el vapor, al igual que con el agua de proceso, se determina mediante la suma de los requerimientos específicos de cada una de las unidades de proceso más un factor de seguridad del 30% [15], [16].

La columna de destilación requiere para el funcionamiento del reboiler un flujo de 25 kg/h de vapor, así como en los intercambiadores de calor que acondicionan las corrientes. Para el extractor sólido-líquido y líquido-líquido, a pesar de que puede utilizar aceite térmico, para este caso específico será operado con vapor; en cuyo caso es necesario un flujo de 12 kg/h de este servicio.

El tren de evaporadores requiere un flujo de 25 kg/h de vapor para el desarrollo de los múltiples calentamientos y cambios de fase para la mezcla. Por otra parte, las unidades de columna de absorción y secador de bandejas no requieren del servicio de vapor para su funcionamiento.

En la figura 34 se muestra el resultado obtenido para el requerimiento de vapor de la planta, con el 30% como factor de seguridad (FS) establecido [15].

### Figura 34

*Flujo total de vapor para las unidades de proceso.*

Equipo	Flujo Vapor (kg/h)	Flujo Vapor con FS (kg/h)
Banco de Reactores	0	0
Columna Absorción	0	0
Columna Destilación	25	32.5
Extractor SL/LL	12	15.6
Secador	0	0
Tren Evaporación	25	32.5
<b>Total</b>	62	<b>80.6</b>

**Nota.** Descripción del flujo total de vapor para cada una de las unidades de proceso y el flujo de vapor requerido teniendo en cuenta un factor de seguridad del 30%, para el correcto funcionamiento del flujo de vapor.

De acuerdo con lo anterior el flujo de vapor requerido para planta piloto es de 80.6 kg/h.

## 2.4 Tuberías

Dependiendo del tipo de fluido que se mueve a través de un tramo de tubería, esta debe ser capaz de soportar las propiedades de cada sustancia que transite por ella. Por lo tanto, el material debe ser suficientemente resistente a la corrosión, erosión, presión, el deterioro por manejar químicos altamente reactivos, calor, entre otros. Siempre cuidando que el proceso sea lo más rentable posible. Para ello, a continuación, se enuncian las características y materiales más apropiados para cada una de las sustancias a trabajar.

En el caso del vapor, es uno de los fluidos que mayor corrosión generan, sino el que más. Además, sus presiones y temperaturas son elevadas, lo cual, descarta por el momento el uso de materiales poliméricos. Las tuberías para sistemas de vapor se fabrican comúnmente con acero al carbono ASTM A106. Se puede usar el mismo material para las líneas de condensado, aunque en algunas industrias se prefiere la tubería de cobre [17].

Para tuberías de vapor sobrecalentado de alta temperatura, se incluyen elementos de aleación adicionales, como cromo y molibdeno, para mejorar la resistencia a la tracción y la resistencia a la fluencia a altas temperaturas. Normalmente, los tubos se suministran en tramos de 6 metros [17].

En cuanto a las tuberías para agua de proceso, como se expresó previamente, llevan a cabo un gran número de actividades, funciones y procesos, por lo que presentan una variación de su calidad. Pero ya que estas aguas no presentan condiciones de presión, temperaturas elevadas y más importantes, no contienen sustancias que pueden llegar a reaccionar con los materiales, se utiliza PVC en caso de que el agua no sea corrosiva y polipropileno (PP) en caso de que si lo sea [18].

Ahora bien, para agua residual dependiendo de sus características se pueden utilizar diferentes materiales. Los accesorios y tuberías usados para el desagüe de fluidos corrosivos están fabricados en polipropileno (PP), es un polímero termoplástico, cristalino que es obtenido de la polimerización del propileno o propeno, este tipo de material es muy resistente a muchos tipos de químicos y fluidos corrosivos. Para aguas residuales no corrosivas, se recomienda el uso de PVC [18].

Adicionalmente, en la tabla a continuación se presentan recomendaciones del material para a la tubería dependiendo de la sustancia química a transportar en ella.



**Tabla 3**

*Selección del material para la fabricación de la tubería dependiendo del químico al que será expuesta.*

Chemical	Piping material								
	Iron or steel	Type 316 stainless	Type 304 stainless	Copper	PVC—type 1	Fiberglass-reinforced polyester (FRP)	Polypropylene	Rubber tubing	Glass
Activated carbon (slurry)		X				X		X	
Alum	NR	S	NR		S	X	X		X
Ammonia, aqua	S	X							
Calcium hydroxide (slurry)	S	X	X		X		X	X	
Calcium hypochlorite					X		X		X
Carbon dioxide (dry)	S	X	X	X	X	X	X	X	
Chlorinated copperas					X			X	
Chlorine (dry gas)	S			X	NR		NR		
Chlorine solution	NR	NR	NR		S	X		X	
Chlorine dioxide (3% soln.)					X				X
Coagulant aids			Consult manufacturer—generally not corrosive						
Copper sulfate		X			S	X	X	X	
Dolomitic lime (slurry)	X	X	X		X		X	X	
Ferric chloride	NR	NR	NR	NR	S	X	X	X	X
Fluosilicic acid	NR	NR	NR		X		X		NR
Hydrochloric acid	NR	NR	NR	NR	X	X	X	X	
Potassium permanganate (2% soln.)	X	X			X	X	X		
Sodium carbonate (soln.)	S				X	X	X	X	
Sodium chloride		X			X	X	X		X
Sodium chlorite					X	X	X		X
Sodium fluoride (1% to 5% soln.)		X			X	X	X	X	
Sodium hexametaphosphate (soln.)		X			X	X		X	
Sodium hydroxide (to 50% soln.)	X	X	X		X	X	X	X	
Sodium hypochlorite (to 16% soln.)					S		X	X	X
Sodium silicate	S	X	X		X	X	X	X	
Sodium silicofluoride			X		X			X	
Sulfur dioxide (dry gas)	X	X	X						X
Sulfur dioxide (soln.)		X							
Sulfuric acid (conc.)	S								
Sulfuric acid	NR				S	X	X	X	X

Key: S = Industrial standard or excellent for handling  
 X = Suitable for handling  
 NR = Not recommended  
 Source: Anderson, 2005.

**Nota.** Selección del material para la fabricación de tubería dependiendo del químico al que será expuesta. Donde S: Uso industrial estándar, X: Apropiado y NR: No recomendado. Tomado de: E. Shashi Menon, P. E., Piping Calculations Manual, 2a ed., New York: McGraw-Hill, 2005.

En la tabla anterior es de notar que los aceros son los materiales más recomendados, debido a sus propiedades que le brindan mayor resistencia a la exposición de cualquier compuesto. Aunque los polímeros tipo PVC y polipropileno también son apropiados para el uso ante una gran variedad de sustancias, no son los ideales.

### **3. NORMATIVIDAD**

Este capítulo está enfocado en la recopilación de la normativa requerida para el cumplimiento legal de los servicios industriales, agua de proceso y agua residual, la tubería requerida para las redes, el sistema contra incendios y las emisiones generadas por ruido y gases, dada la naturaleza del proceso.

#### **3.1 Servicios industriales**

La normativa colombiana regula el uso del agua en procesos industriales con el fin de controlar el consumo de este recurso; por otra parte, también cuenta con la legislación pertinente para el vertimiento de aguas residuales en alcantarillado, y son de estricto cumplimiento a fin de evitar contaminación ambiental.

##### **3.1.1 Agua de proceso**

Uno de los recursos naturales más utilizados en la industria es el agua. Como se mencionó en el capítulo anterior, todas las unidades de proceso requieren de este recurso para su correcto funcionamiento por lo que se debe cumplir con los requisitos legales para poder aprovecharlo de la manera correcta.

Para hacer uso del agua en el proceso, de acuerdo al Decreto 1541 de 1978 se requiere principalmente una concesión que debe solicitarse al Instituto Nacional de los Recursos Naturales renovables y del Ambiente, en la que se exprese la destinación del recurso, la cantidad de agua que se desee utilizar en litros por segundo, además de la Declaración de Efecto Ambiental, entre otros que se pueden consultar en el artículo 54 del decreto mencionado [19].

Aparte de lo dispuesto en el decreto es necesario presentar, de acuerdo con especificaciones del Instituto Nacional de los Recursos Naturales, un estudio de factibilidad del proyecto industrial y el estudio ecológico y ambiental [19].

Por otra parte, el Decreto 2811 de 1974 en sus artículos 27 y 28 solicita la declaración de peligros presumibles de deterioro ambiental efecto de la actividad

realizada, así como aquellas que puedan producir deterioro grave a los recursos naturales para lo que además se debe solicitar licencia ambiental [20].

### **3.1.2 Aguas residuales**

La implementación de la planta química contempla el uso de diferentes unidades de proceso que en su funcionamiento generan agua residual industrial, esta debe ser sometida a un tratamiento adecuado que cumpla con la legislación vigente dictada por las autoridades ambientales para su posterior disposición [19].

De acuerdo con el Ministerio de Ambiente, la norma de vertimientos contempla la Resolución 0631 del 2015 donde se establecen los parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles de aguas residuales para el vertimiento al alcantarillado, esta resolución es de obligatorio cumplimiento para todas las actividades industriales [21].

El sector que corresponde a la planta química es el de “Actividades de fabricación y manufactura de bienes”, en el capítulo 8 de la resolución se especifica la actividad que en este caso es la “fabricación de sustancias y productos químicos”. En tabla 4 se encuentran los límites máximos permisibles para los parámetros [21].

Por otra parte, de acuerdo con el Decreto 1542 de 1978 siempre que sea rentable y técnicamente factible el agua residual debe ser reciclada, lo que quiere decir recuperarlas para nuevo uso, de no ser posible se deben cumplir los parámetros de vertimiento. Además de estos parámetros, se debe garantizar que el agua que será vertida tenga la misma temperatura que la de la corriente. [19]

**Tabla 4**

*Parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles de aguas residuales para el vertimiento al alcantarillado.*

PARAMETRO	UNIDADES	FABRICACIÓN DE SUSTANCIAS Y PRODUCTOS QUÍMICOS	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS DE AZUL ULTRAMAR	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS DE ÓXIDOS DE HIERRO	FABRICACIÓN DE PIGMENTOS INORGÁNICOS DE CROMATOS Y MOLIBDATOS DE PLOMO
<b>General</b>					
pH	Unidades de pH	5 a 9	5 a 9	5 a 9	5 a 9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O <sub>2</sub>	1200	750	750	300
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO <sub>5</sub> )	mg/L O <sub>2</sub>	900	300	300	225
Sólidos Suspendidos Totales (SSED)	mg/L	300	300	300	225
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	7.5	7.5	7.5	7.5
Grasas y Aceites	mg/L	37.5	37.5	37.5	37.5
Fenoles	mg/L	0.2			
Formaldehído	mg/L	Análisis y Reporte			
Sustancias Activas al Azul de Metileno (SAAM)	mg/L	Análisis y Reporte			
<b>Hidrocarburos</b>					
Hidrocarburos Totales (HTP)	mg/L	10			
<b>Compuestos de Fósforo</b>					
Fósforo Total (P)	mg/L	Análisis y Reporte			

<b>Compuestos de Nitrógeno</b>					
Nitratos (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	mg/L				Análisis y Reporte
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sub>3</sub> )	mg/L				Análisis y Reporte
Nitrógeno Total (N)	mg/L	Análisis y Reporte			Análisis y Reporte
<b>Iones</b>					
Cianuro Total (CN <sup>-</sup> )	mg/L	0.5			
Cloruros (Cl <sup>-</sup> )	mg/L		Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfatos (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	mg/L	400	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Sulfuros (S <sup>2-</sup> )	mg/L	1			
<b>Metales y Metaloides</b>					
Arsénico (As)	mg/L	0.1			
Cadmio (Cd)	mg/L	0.05			
Cinc (Zn)	mg/L	3		3	3
Cobalto (Co)	mg/L	Análisis y Reporte			
Cobre (Cu)	mg/L	1			
Cromo (Cr)	mg/L	0.5			0.5
Hierro (Fe)	mg/L			5	
Mercurio (Hg)	mg/L	0.01			
Níquel (Ni)	mg/L	0.5			
Plomo (Pb)	mg/L	0.2			0.5
Selenio (Se)	mg/L	0.2			
<b>Otros Parámetros para Análisis y Reporte</b>					
Acidez Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Alcalinidad Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

Dureza Total	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte
Color Real (Medidas de absorbancia a las siguientes longitudes de onda: 436 nm, 525 nm y 620 nm)	m <sup>-1</sup>	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte	Análisis y Reporte

**Nota.** En la tabla anterior se encuentran descritos los parámetros fisicoquímicos y valores límites máximos permisibles de aguas residuales para el vertimiento al alcantarillado. Tomado de: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Marzo 17, 2015)"Resolución 0631 de 2015"

Por último, es importante mencionar que la Universidad América tiene proyectada la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Se planea ubicarla en la misma zona donde se propone instalar la planta piloto. La PTAR tendrá como objetivo tratar el mayor contenido de residuos posibles. Por otra parte, se tiene en consideración la presencia de residuos clasificados como RESPEL (Registro de generadores de residuos sólidos peligros) por lo que el agua será enviada a una empresa externa que finalice con el tratamiento y realice la disposición correspondiente [21].

### **3.2 Sistema contra incendios**

Para la correcta implementación de una planta química es necesario un sistema contra incendios debido a la naturaleza del proceso. Teniendo en cuenta que para que se genere y propague el fuego se requiere de tres elementos: combustible, calor y oxígeno, y debido a la presencia de materiales inflamables y las unidades de proceso que generan calor, existe una alta tasa de probabilidad de ocurrencia de un incendio dentro de las instalaciones, por lo que se debe cumplir con la normativa que asegure el bienestar de todos aquellos individuos dentro y fuera del edificio con un sistema de detección, extinción o retardo [22].

#### **3.2.1 Rociadores**

Existen diferentes variedades de sistemas de extinción de incendios, entre ellos está el sistema por rociadores que contempla el uso de agua nebulizada, agua pulverizada o rociadores automáticos. Para seleccionar el mejor sistema que se ajuste a la necesidad de la planta, se debe tener en cuenta la funcionalidad de cada uno como se describirá a continuación [22].

El método por rociadores automáticos consiste en el uso de agua para la extinción de fuego, activado automáticamente por un componente que se funde por efecto de la temperatura y permite la liberación de agua propulsada. Este sistema es apto para industrias como centros comerciales, hospitales, hoteles, entre otros [22]. El funcionamiento de este método se basa en el sofocamiento y enfriamiento, trabajando a

una presión de 3 y 10 bar, no se recomienda su uso en lugares que cuenten con productos que reaccionan violentamente con el agua. La normativa utilizada para su implementación es la NFPA 13, NTC 2301 y UNE-EN 12845 [22].

También está el método de extinción por agua nebulizada, que utiliza pequeñas gotas de agua para enfriar el fuego evaporándolo y atenuando el calor. Se basa en el principio de sofocación, enfriamiento y desplazamiento de oxígeno logrando la extinción del fuego. Se debe cumplir con la norma NFPA 750 [22].

Por último, el método por agua pulverizada tiene un funcionamiento similar al de los rociadores automáticos, pero estos no tienen ningún dispositivo que libere el orificio ya que este se encuentra abierto y destacan por su activación inmediata. Este sistema se utiliza en depósitos de productos químicos y almacenes de productos inflamables, por lo que resulta ser la mejor opción de implementación en la planta piloto. Este sistema se rige por la norma NFPA 15 [22].

### **3.2.2 Extintores**

Por otra parte, se pueden utilizar extintores portátiles contra incendios que se rigen mediante la norma NTC 2885. Para la selección del tipo de extintor adecuado se deben tener en cuenta diferentes factores como los son el tipo de incendio, el tamaño, riesgos en el área, presencia de equipos energizados y temperatura ambiente [23].

Según la norma mencionada anteriormente, la clase de incendio con mayor probabilidad de ocurrencia es la “Clase B”, que se identifica por los incendios de líquidos inflamables, líquidos combustibles, disolventes, alcoholes, entre otros. La planta se clasifica como “Riesgo extra o alto” donde se tiene una alta cantidad del material combustible [23].

De acuerdo con esta clasificación, para incendios que no sean de líquidos inflamables de profundidad apreciable los extintores deben tener una clasificación básica mínima de 40B con una distancia máxima de recorrido hasta los extintores de 9,15m o de clasificación 80B con una distancia máxima de 15,25m. Se requieren de hasta tres extintores AFFF (Espuma formadora de película acuosa) o FFFP (Espuma de fluoroproteína formadora de película) de por los menos 2,5 galones [23].



Si el incendio es de líquido inflamable con profundidad apreciable, se debe tener en cuenta que los extintores no deben ser el único medio de protección. Los extintores deben estar colocados a lo largo de las vías normales de desplazamiento y no deben estar obstruidos ni ocultos a la vista [23].

### **3.3 Tubería**

De acuerdo con la Resolución 501 de 2017 por la cual se expiden los requisitos técnicos relacionados con composición química e información, que deben cumplir los tubos, el artículo 10 presenta la información mínima que debe ser consignada en el rotulado de los tubos [24], esta es:

1. Uso del tubo.
2. Reglamento técnico, norma técnica colombiana o internacional.
3. Diámetro exterior o nominal.
4. Presión de trabajo.
5. Fecha de fabricación del tubo e identificación del lote.

#### ***3.3.1 Agua de proceso y aguas residuales***

Como se mencionó en el capítulo anterior, la tubería que se utiliza comúnmente para el agua no corrosiva es PVC. La instalación de la tubería para la conducción de agua sin presión se emplea la Norma Técnica Colombiana 1259 que especifica los métodos de instalación de tuberías enterradas donde se establecen las condiciones generales de cimentación, colocación de la tubería y relleno de zanjas [25].

Por otra parte, la fabricación de la tubería debe cumplir con una normativa específica que rige al material, en el caso nacional es la Norma Técnica Colombiana 382 que tiene como nombre “Plásticos. Tubos de policloruro de vinilo (PVC) clasificados según la presión (Serie RDE)” y tiene correspondencia internacional a la norma ASTM D2241 [25].

Para seleccionar la tubería que mejor se adapte a las necesidades del modelo final de las redes de agua de proceso y agua residual, se cuenta con las especificaciones

comerciales de la tubería de acuerdo con la presión de trabajo, allí se tiene el diámetro nominal, peso de la tubería, diámetro exterior, espesor de la pared y el diámetro interior.

En dado caso que el agua de proceso muestre indicios de corrosión, la tubería recomendada será la de polipropileno, que está reglamentada nacionalmente por la Norma Técnica Colombiana 4897, e internacionalmente por la ISO 15874. La norma nacional se divide en cuatro partes, entre estas se encuentra la fabricación de la tubería de acuerdo con el material, apariencia, dimensiones, características mecánicas y físicas, y las pruebas que certifican el control de calidad [25].

Las fichas técnicas comerciales de la tubería de polipropileno cuentan con información sobre el diámetro externo e interno de la tubería, espesor de la pared, presión máxima de trabajo, peso de la tubería, temperatura máxima de trabajo y el caudal en L/s. Esta información será de utilidad para la selección de la tubería de acuerdo con las condiciones de trabajo y el modelo de redes seleccionado [25].

### **3.3.2 Vapor**

Debido a que el vapor es un fluido corrosivo, la tubería que se utiliza comercialmente es en acero al carbón. Siguiendo la normativa internacional ASTM A106, donde se especifican los diferentes grados de acero comercial, se diferencian por la composición química de estos y las diferentes condiciones de trabajo a las que apliquen. Esta norma cuenta con las pruebas mecánicas que debe cumplir la tubería y con especificaciones mínimas requeridas por cada prueba [26].

La Norma Técnica Colombiana 1560 establece las especificaciones técnicas del tubo de acero al carbón para uso general donde se cuenta con los requerimientos de fabricación como lo es el material, las dimensiones y tolerancia de la tubería, y cuenta con los ensayos de prueba de calidad de la tubería [26].

Si la tubería es de acero al carbón aleada con molibdeno, la normativa correspondiente es la ASTM A209; donde se especifica la composición química requerida, los requisitos respecto a las propiedades mecánicas y los procedimientos de ensayo que garanticen la calidad del producto [26].

Debido a que el vapor fluye a alta temperatura, se debe cumplir con el Reglamento Técnico de Instalaciones Térmicas en Edificaciones (RITE 2017), donde se establece en primera instancia el uso de aislamiento térmico para todas aquellas tuberías que tengan un fluido mayor a 40°C donde se calculara el espesor mínimo como lo dicta el reglamento [27].

### **3.4 Emisiones de gases**

El sector industrial es considerado una de las fuentes principales de contaminación atmosférica debido a los gases generados por los diferentes procesos que existen en las plantas [28].

La planta piloto cuenta con seis unidades de proceso. Algunas de ellas contarán con diferentes químicos que por su naturaleza o reacciones presentes generarán gases, que al ser liberados pueden ocasionar contaminación atmosférica. Además, el vapor requerido en el funcionamiento de las unidades será alimentado por una caldera, por lo que las emisiones de esta están sujetas a la normativa [28]. De acuerdo con esto la legislación colombiana en la Resolución 0601 de 2006 donde se establece la “Norma de calidad de aire o nivel de emisión para todo el territorio nacional”, especifica los máximos niveles permisibles para contaminantes [28], estos se muestran en la tabla a continuación:

**Tabla 5***Niveles máximos permisibles para contaminantes.*

Contaminante	Unidad	Limite máximo permisible	Tiempo de exposición
PST (partículas suspendidas totales)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	100	Anual
		300	24 horas
PM10	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	70	Anual
		150	24 horas
SO <sub>2</sub>	ppm ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.031 (80)	Anual
		0.096 (250)	24 horas
		0.287 (750)	3 horas
NO <sub>2</sub>	ppm ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.053 (100)	Anual
		0.08 (150)	24 horas
		0.106 (200)	1 hora
O <sub>3</sub>	ppm ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.041 (80)	8 horas
		0.061 (120)	1 hora
CO	ppm ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	8.8 (10)	8 horas
		35 (40)	1 hora

**Nota.** Se presentan los niveles máximos permisibles para la exposición a contaminantes en el aire. Los  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  a condiciones ambientales 298,15°K y 101,325 KPa. Tomado de: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Abril 4, 2006) "Resolucion 0601 de 2006".

Adicionalmente, la norma contempla los niveles máximos permisibles para sustancias contaminantes no convencionales y umbrales para las principales sustancias generadoras de olores ofensivos, estos niveles se muestran en las tablas a continuación respectivamente:

**Tabla 6**

*Niveles máximos permisibles para contaminantes no convencionales con efectos cancerígenos.*

<b>Contaminante no convencional</b>	<b>Unidad</b>	<b>Límite permisible</b>	<b>Máximo tiempo de exposición</b>
Benceno	mg/m <sup>3</sup>	5	1 año
Plomo y compuestos	mg/m <sup>3</sup>	0.5	1 año
	mg/m <sup>3</sup>	15	3 meses
Cadmio	mg/m <sup>3</sup>	5x10 <sup>-3</sup>	1 año
Mercurio	mg/m <sup>3</sup>	1	4 meses
Hidrocarburos totales como metano	mg/m <sup>3</sup>	1.5	4 meses
Tolueno	mg/m <sup>3</sup>	260	1 semana
	mg/m <sup>3</sup>	1000	30 minutos
Vanaio	mg/m <sup>3</sup>	1	24 horas

**Nota.** Se presentan los niveles máximos permisibles para la exposición a contaminantes no convencionales cancerígenos en el aire. Tomado de: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Abril 4, 2006) "Resolucion 0601 de 2006".

**Tabla 7**

*Principales sustancias generadores de olores ofensivos-umbral.*

<b>Contaminante</b>	<b>Umbral ppm (volumen)</b>	<b>µg/m<sup>3</sup></b>
Acetaldehído (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O)	0.21	380
Ácido Butírico (C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	0.001	3.6
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0.05	14.5
Clorofenol (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ClO)	0.00003	0.1
Dicloruro de azufre (S <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> )	0.001	5.5
Etil mercaptano (C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> SH)	0.0002	0.5
Etil acrilato (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> )	0.00047	2
Estireno (C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> )	0.047	200
Monometil amina (CH <sub>5</sub> N)	0.021	27
Metil mercaptano (CH <sub>3</sub> SH)	0.002	3.9
Nitrobenceno (C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NO <sub>2</sub> )	0.0047	4.5
Propil mercaptano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> S)	0.007	2.2
Butil mercaptano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S)	0.0007	0.26
Sulfuro de dimetil (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S)	0.002	3.8
Sulfuro de hidrogeno (H <sub>2</sub> S)	0.005	7

**Nota.** Se presenta los umbrales para cada contaminante generador de olores ofensivos. Tomado de: Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Abril 4, 2006) "Resolucion 0601 de 2006".

Por último, según la resolución 1208 de septiembre de 2003 la industria química tiene el deber de monitorear los siguientes parámetros [29]:

1. Partículas suspendidas totales -PST
2. Dióxidos de azufre -SO<sub>2</sub>
3. Oxidos de nitrógeno-Nox
4. Ácido Clorhídrico -HCl
5. Benceno
6. 1-2 dicloroetano
7. Amoniaco (NH<sub>3</sub>)

## 8. Cloruro de Vinilo

### 3.5 Emisión de ruido

Es importante tener en cuenta que las unidades de proceso que se utilizarán para la planta piloto generan cierta emisión de ruido por los equipos que ellas contienen, como lo son los compresores.

Se tiene planeado que la ubicación de la planta piloto sea dentro de las instalaciones de la sede del Eco campus de los cerros. Estas instalaciones están destinadas a la formación de estudiantes universitarios, por lo que se considera que es un sector B de acuerdo a la Resolución 627 de 2006 que lo categoriza como un sector de “tranquilidad y ruido moderado” donde los estándares máximos permisibles de niveles de emisión de ruido en unidades de decibeles (dB A) sean en el día 65 dB A y en la noche 55 dB A [30].

Este parámetro debe ser controlado y monitoreado según lo dicta la norma mencionada, en dado caso que se deban tomar decisiones de diseño para mitigar la emisión de ruido de los equipos presentes [30].

### 3.6 Duchas de emergencia

Según el código de regulaciones federales de los Estados Unidos, si los ojos o el cuerpo de un individuo pueden estar expuestos a materiales perjudiciales o corrosivos, se deben proporcionar instalaciones adecuadas para el lavado rápido dentro del área de trabajo para utilizar de inmediato en caso de emergencia [31].

Por lo anterior se propone la puesta de tres duchas de emergencia distribuidas en toda el área de la planta piloto, y se utiliza el estándar ANSI/ISEA Z358.1-2014 que es ampliamente utilizado en la industria como guía para el cumplimiento mínimo de los requisitos para estos equipos [31].

De acuerdo con esta guía las duchas deben contar con un mecanismo de válvulas que permita la apertura del flujo en un segundo o menos, y permanecer abierto hasta que se cierre manualmente. El fluido que puede ser utilizado es agua potable, agua

preservada, solución salina tamponada y preservada, para el caso de la planta piloto se utilizará agua potable. Por otra parte, el equipo debe ser resistente a la corrosión y estar situado a menos de 16.8m de cualquier peligro existente. Por último, debe estar ubicada a una altura de 2083mm a 2438mm y cumplir con un diámetro del patrón de aspersión de 20in, además de asegurar un flujo continuo de 76 l/min al menos durante 15 min [31].



## 4. MEMORIAS DE CÁLCULO

A continuación, se presentan las memorias de cálculo utilizadas para determinar y caracterizar el flujo de los fluidos de servicio evaluados en este trabajo (vapor, agua de proceso y agua residual). Así como el procedimiento para la determinación de ciertas variables de diseño, como lo es el diámetro, para las redes de tuberías.

### 4.1 Flujo de Fluidos en Tuberías

Es fundamental comenzar con la ecuación de Bernoulli, siendo la expresión que relaciona la energía de presión, cinética y potencial, en términos de longitud o presión [32].

Ecuación de Bernoulli en términos de longitud o altura de fluido:

Ecuación 2. Bernoulli

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + h_p = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_f$$

Ecuación de Bernoulli en términos de presión:

Ecuación 3. Bernoulli

$$P_1 + \alpha_1 \frac{\rho v_1^2}{2} + \gamma z_1 + \gamma h_p = P_2 + \alpha_2 \frac{\rho v_2^2}{2} + \gamma z_2 + \gamma h_f$$

Donde  $P$  es la presión del fluido,  $v$  la velocidad del fluido,  $z$  la altura sobre un nivel de referencia del fluido,  $g$  la aceleración de la gravedad,  $h_p$  es la potencia de una bomba o impulsor traducida a altura de fluido,  $h_f$  son las pérdidas de presión en unidades de altura de fluido,  $\gamma$  es el peso específico y  $\alpha$  es un parámetro de energía cinética que depende del régimen de flujo; siendo 1 para flujo uniforme o altamente turbulento, 1.08 para flujo turbulento y 2 para flujo laminar [32].

Las pérdidas de presión o energía  $h_f$  pueden definirse como la suma entre las perdidas mayores, debido a la fricción del fluido con la tubería y las menores, debido a los cambios de dirección y diámetro en accesorios [33]. Determinadas mediante la ecuación de Darcy-Weisbach, presentada a continuación:

Ecuación 4. Darcy-Weisbach

$$h_f = h_{f \text{ mayor}} + h_{f \text{ menor}}$$

Donde:

Ecuación 5. Darcy-Weisbach

$$h_{f \text{ mayor}} = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 6. Darcy-Weisbach

$$h_{f \text{ menor}} = \sum K * \frac{v^2}{2g}$$

Ecuación 7. Darcy-Weisbach

$$h_f = \left( f * \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{v^2}{2g}$$

Para las cuales  $f$  es el factor de fricción de Darcy,  $L$  la longitud del tramo de tubería,  $D$  el diámetro de la sección de tubería analizada y  $K$  es el coeficiente de pérdidas para cada accesorio. Según Crane, el valor de  $K$  puede determinarse mediante la multiplicación de un factor  $L/D$  específico para cada accesorio por el factor de fricción [33]. Esos factores se presentan en la tabla a continuación:

**Tabla 8**

*Factor L/D para cada accesorio.*

Accesorios	factor L/D
Codo Estándar 90°	30
Codo Estándar 45°	16
Curvas 180° radio corto	50
Conexión estándar T flujo directo	60
Conexión estándar T flujo Desviado 90°	60
Curvas y Codos 90° r/d=1	20
Curvas y Codos 90° r/d=1.5	14
Curvas y Codos 90° r/d=2	12
Curvas y Codos 90° r/d=3	12
Curvas y Codos 90° r/d=4	14
Curvas y Codos 90° r/d=6	17
Curvas y Codos 90° r/d=8	24
Curvas y Codos 90° r/d=10	30
Curvas y Codos 90° r/d=12	34
Curvas y Codos 90° r/d=14	38
Curvas y Codos 90° r/d=16	42
Curvas y Codos 90° r/d=20	50

Accesorios	factor L/D
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=0^\circ$	2
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=15^\circ$	4
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=30^\circ$	8
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=45^\circ$	15
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=60^\circ$	25
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=75^\circ$	40
Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=90^\circ$	60
Salidas Con resalte	1
Salidas de Cantos Vivos	1
Salidas Redondeada	1
Entrada con resalte hacia el interior	0.78
Entrada de tubería a tope $r/d=0$	0.5
Entrada de tubería a tope $r/d=0.02$	0.28
Entrada de tubería a tope $r/d=0.04$	0.24
Entrada de tubería a tope $r/d=0.06$	0.15
Entrada de tubería a tope $r/d=0.10$	0.09
Entrada de tubería a tope $r/d=0.15$	0.04

Accesorios	factor L/D
Válvulas De Macho y Llaves Paso Directo	18
Válvulas De Macho y Llaves Tres Entradas $180^\circ$	30
Válvulas De Macho y Llaves Tres Entradas $90^\circ$	90
Válvulas de Compuerta	8
Válvulas de Retención de Disco Oscilante en Y	100
Válvulas de Retención de Disco Oscilante	50
Válvulas de Globo	340
Válvulas de Angular	55
Válvulas de Angular $90^\circ$	150
Válvula de Retención y Cierre Tipo Recto 1	400
Válvula de Retención y Cierre Tipo Recto 2	300
Válvula de Retención y Cierre Tipo Recto 3	55
Válvula de Retención y Cierre Tipo Rectangular 1	200
Válvula de Retención y Cierre Tipo Rectangular 2	350
Válvula de Retención y Cierre Tipo Rectangular 3	55
Válvula Mariposa D entre 50 mm a 200 mm	45
Válvula Mariposa D entre 250 mm a 350 mm	35
Válvula Mariposa D entre 400 mm a 600 mm	25

**Nota.** Factor L/D tomado del libro de Crane para determinar el valor de cada de cada accesorio. Tomado de: Crane, Flujo De Fluidos En Válvulas, Accesorios Y Tuberías. México D. F: McGraw-Hill, 1987.

Ahora bien, para especificar todo lo anterior es necesario conocer el valor para el factor de fricción, el cual depende del régimen de flujo, dado por el Numero Reynolds (Re), y la rugosidad de la tubería (e), de acuerdo con el material de esta.

Para la rugosidad se tienen tablas como la presentada a continuación:

**Tabla 9**

*Rugosidad interna de la tubería.*

Pipe material	Roughness	
	in	mm
Riveted steel	0.035–0.35	0.9–9.0
Commercial steel/welded steel	0.0018	0.045
Cast iron	0.010	0.26
Galvanized iron	0.006	0.15
Asphalted cast iron	0.0047	0.12
Wrought iron	0.0018	0.045
PVC, drawn tubing, glass	0.000059	0.0015
Concrete	0.0118–0.118	0.3–3.0

**Nota.** Rugosidad interna de tubería en pulgadas o milímetros, de acuerdo con el material de la tubería. Tomado de: E. Shashi Menon, P. E., Piping Calculations Manual, 2a ed., New York: McGraw-Hill, 2005.

Con respecto al número de Reynolds, es una relación adimensional que pretende describir el régimen de flujo. En otras palabras, el número de Reynolds caracteriza la relación entre las fuerzas de inercia y las fuerzas de fricción viscosa en el flujo de un fluido. La alteración de este criterio refleja el cambio de la relación entre esas fuerzas, lo que a su vez influye en el carácter del flujo de líquido. A raíz de ello, habitualmente, se distingue entre tres tipos de flujo, dependiendo del número de Reynolds. Cuando el  $Re < 2100$  se trata de flujo laminar [32], en este caso el líquido fluye en capas finas que prácticamente no se mezclan entre sí. Este flujo se caracteriza por un aumento paulatino de la velocidad en dirección de las paredes del tubo hacia el centro. Con el aumento del número de Reynolds empieza la desestabilización de la estructura de flujo. El valor del número de Reynolds que se encuentre entre  $2100 < Re < 4000$  corresponde al régimen de transición o crítico, en el cual las capas separadas empiecen a mezclarse entre sí. Cuando el número de Reynolds  $Re > 4000$ , se establece un régimen estable que se

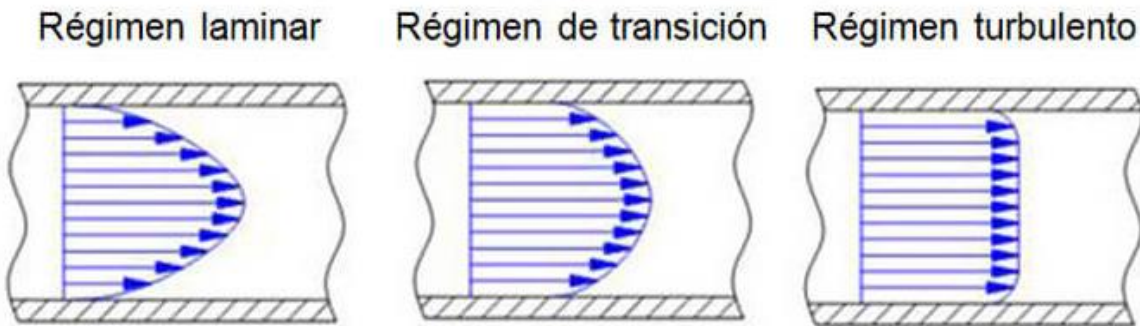
caracteriza por unos cambios aleatorios de la velocidad y del sentido de flujo en cada punto aislado, como resultado las velocidades en todo el volumen del flujo se igualan. Este régimen se llama el régimen turbulento [32].

El número de Reynolds depende de la presión generada por la bomba, la viscosidad del flujo bajo la temperatura de trabajo, así como de las dimensiones y la sección del tubo por el cual pasa el fluido [32].

En las figuras a continuación, puede verse el perfil de flujo y el carácter de flujo para cada uno de los regímenes[14].

### Figura 35

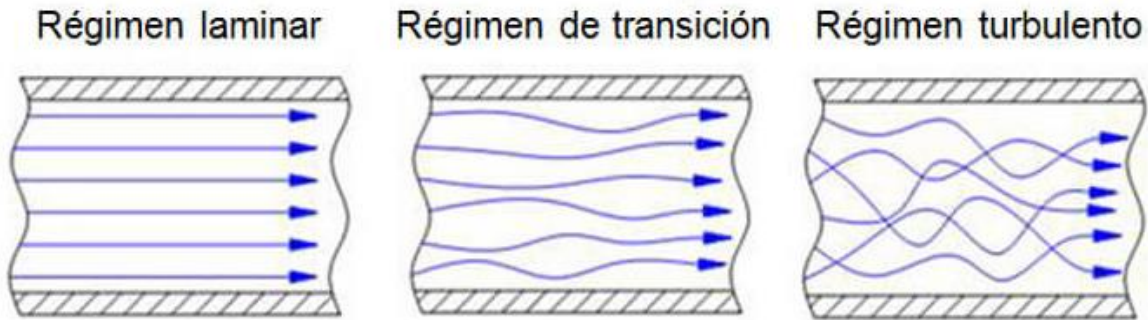
Perfil de velocidad de acuerdo con el régimen del fluido.



**Nota.** Perfil de velocidad del fluido dentro de la tubería de acuerdo con el régimen de Reynolds en el que encuentre. Tomado de: E. Shashi Menon, P. E., Piping Calculations Manual, 2a ed., New York: McGraw-Hill, 2005.

**Figura 36**

*Perfil de flujo de acuerdo con el régimen del fluido.*



**Nota.** Perfil de flujo del fluido dentro de la tubería de acuerdo con el régimen de Reynolds en el que encuentre. Tomado de: E. Shashi Menon, P. E., Piping Calculations Manual, 2a ed., New York: McGraw-Hill, 2005.

Para el cálculo del número de Reynolds, se presentan las siguientes expresiones:

Ecuación 8. Reynolds

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

En donde,  $V$  es la velocidad del fluido dentro de la tubería,  $D$  es el diámetro interno de la tubería,  $\rho$  es la densidad del fluido,  $\nu$  la viscosidad cinemática y  $\mu$  la viscosidad dinámica.

Como se mencionó anteriormente el factor de fricción presentará un comportamiento diferente dependiendo del régimen, por ello:

Para  $Re < 2100$  el factor de fricción se calcula mediante la siguiente expresión [14], [32]:

Ecuación 9. Reynolds

$$f = \frac{64}{Re}$$

Para régimen transitorio,  $2100 < Re < 4000$ , el factor de fricción se calcula mediante la ecuación de Blasius [14], presentada a continuación:

Ecuación 10. Blasius

$$f = 0.3164 * Re^{-0.25}$$

Para un régimen turbulento, con  $Re > 4000$  se utiliza la ecuación de Colebrook-White [14], [32], la cual es la siguiente:

Ecuación 11. Colebrook-White

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left( \frac{e}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)$$

O despejada:

Ecuación 12. Colebrook-White

$$f = \left( \frac{1}{-2 \log_{10} \left( \frac{e}{3.7 * D} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}} \right)} \right)^2$$

Esta expresión es iterativa, por lo cual se comienza asumiendo un valor de  $f$ , este se ingresa en la ecuación, calculando un nuevo valor  $f$ ; el cual será introducido nuevamente a la expresión. Y así sucesivamente hasta que los valores entre el  $f$  previo y el nuevo no varíen en más de  $1 \times 10^{-8}$ .

#### 4.1.1 Caudal

Ahora bien, para determinar el caudal que pasara a través de una tubería de diámetro  $D$ , longitud  $L$ , rugosidad  $e$ , pérdidas  $h_f$  y el valor  $K$  de los accesorios; se debe realizar el siguiente procedimiento iterativo.

Primero se asume un valor inicial para  $f$ , luego se procede a calcular la velocidad despejándola de la ecuación de pérdidas  $h_f$  (ecuación 7), quedando de la siguiente forma al aplicar el concepto para calcular  $K$  de Crane [33]:

Ecuación 13. Darcy-Weisbach

$$V = \sqrt{\frac{2g h_f}{f \frac{L}{D} + K}} = \sqrt{\frac{2g h_f}{f \left( \frac{L}{D} + \left( \frac{L}{D} \right)_{Ac} \right)}}$$

Luego de obtener la velocidad, se calcula el valor para el número de Reynolds, mediante la expresión anteriormente vista (ecuación 8) y con las propiedades del fluido según corresponda (vapor, agua residual o agua de proceso) a condiciones de presión y temperatura. Con el  $Re$ , se calcula el  $f$  y se evalúa la diferencia entre el asumido y este

[14]. Si su diferencia es mayor a  $1 \times 10^{-8}$ , se utiliza el nuevo factor de fricción para calcular una nueva velocidad y así seguir hasta que la diferencia entre el  $f$  anterior y el nuevo sea menor a la tolerancia propuesta. Cuando dada situación ocurra, se multiplica la última velocidad obtenida por el área transversal para obtener el caudal [32]. Como se muestra a continuación:

Ecuación 14. Continuidad

$$Q = V * \frac{\pi}{4} * D^2$$

De esta manera, se obtiene el flujo de fluido que debe atravesar por la tubería de las condiciones establecidas para que presente la caída de presión o pérdidas fijadas.

#### 4.1.2 Diámetro

Con el fin de determinar el diámetro que debe tener una tubería (con material y por ende rugosidad definida), para que un fluido a un caudal determinado tenga una caída de presión o pérdidas especificadas, se debe realizar el siguiente procedimiento:

Primero, se debe calcular u obtener la densidad y viscosidad, ya sea cinemática o dinámica, del fluido a trabajar (agua o vapor) [14]. Con el conocimiento de estas propiedades a las condiciones de temperatura y presión a trabajar, se procede a asumir un valor para el factor de fricción. Con este  $f$ , se calcula el diámetro despejando de la ecuación para pérdidas mayores de tubería (ecuación 5), el despeje sería el siguiente teniendo en cuenta que  $Q = V * A$ :

Ecuación 15. Darcy-Weisbach

$$D = \left( \frac{0.0826 * f * Q^2 * L}{h_f} \right)^{\frac{1}{5}}$$

Posteriormente se calcula el número de Reynolds con este diámetro. Dependiendo el valor para Re, se utiliza la ecuación correspondiente para calcular  $f$  [14]. Se compara el nuevo factor de fricción con el anterior y si su diferencia no es menor a  $1 \times 10^{-8}$ ; se procede a repetir el proceso nuevamente hasta que se alcance la tolerancia deseada. Y este será el diámetro óptimo para las condiciones especificadas.

Por otra parte, existen otras metodologías, en este caso empíricas, basadas en heurísticas que permiten determinar este diámetro óptimo. Como son las de Towler y



Sinnott [34], que definen las siguientes ecuaciones en función del material de la tubería y el rango de tamaño esperado; teniendo en cuenta flujo turbulento:

Para acero al carbono desde 25 mm hasta 200 mm, se tiene la siguiente expresión:

Ecuación 16. Diámetro Óptimo

$$d_{i,opt} = 0.664 G^{0.51} \rho^{-0.36}$$

Para acero al carbono desde 250 mm hasta 600 mm, se tiene la siguiente expresión:

Ecuación 17. Diámetro Óptimo

$$d_{i,opt} = 0.534 G^{0.43} \rho^{-0.30}$$

Para acero inoxidable desde 25 mm hasta 200 mm, se tiene la siguiente expresión:

Ecuación 18. Diámetro Óptimo

$$d_{i,opt} = 0.55 G^{0.49} \rho^{-0.35}$$

Para acero inoxidable desde 250 mm hasta 600 mm, se tiene la siguiente expresión:

Ecuación 19. Diámetro Óptimo

$$d_{i,opt} = 0.465 G^{0.43} \rho^{-0.31}$$

Donde  $d_{i,opt}$  es el diámetro óptimo en m,  $G$  es la tasa de flujo en kg/s y  $\rho$  la densidad en kg/m<sup>3</sup>. Cabe resaltar que a pesar de que este método es más sencillo, se llevó a cabo la programación con el cálculo iterativo de la ecuación de Bernoulli, es decir la primera de esta sección.

#### **4.1.3 Pérdidas**

Para determinar las pérdidas debido a la fricción en la tubería y la presencia de accesorios, para un fluido que fluye a determinado caudal por medio de una tubería de diámetro, longitud, rugosidad, cantidad y tipo de accesorios conocidos. Se lleva a cabo, a diferencia de los procedimientos anteriores, un procedimiento no iterativo sino directo. En el cual:

Primero se determinan las propiedades necesarias del fluido, como son la densidad y la viscosidad cinemática. Luego, se calcula la velocidad de flujo mediante la siguiente expresión sencilla y de uso común:

Ecuación 20. Continuidad

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Luego de calcular la velocidad, se utiliza en la expresión que determina el número de Reynolds (ecuación 8). Dependiendo del valor resultante se establece el régimen al que pertenece el fluido y se calcula el factor de fricción  $f$  de acuerdo con esto.

Con la relación de la longitud y el diámetro de la tubería, el factor de fricción, y la velocidad, se calculan las pérdidas mayores (ecuación 5), y mediante el factor de Crane para los accesorios, se calcula  $K$  y las pérdidas menores (ecuación 6) o por accesorios [33]. Finalmente, la suma de ellas dos entrega el valor de  $h_f$  final.

En caso de que se evalué más de una sección de tuberías, y presenten diferencias de diámetro, se debe tener en cuenta las siguientes ecuaciones para calcular esas pérdidas adicionales por ensanchamiento y estrechamiento [33].

Primero, se determina el valor de  $\beta$ , definido por la ecuación 21:

Ecuación 21. Crane

$$\beta = \frac{\text{Diámetro menor}}{\text{Diámetro mayor}}$$

Ahora para estrechamiento, dependiendo del ángulo  $\theta$  por el cual se da el cambio de diámetro,  $K$  será igual a la ecuación 22 para  $\theta \leq 45$  y se utiliza ecuación 23 si  $\theta > 45$ :

Ecuación 22. Crane

$$K = \frac{0.8 * \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) (1 - \beta^2)}{\beta^4}$$

Ecuación 23. Crane

$$K = \frac{0.5 * (1 - \beta^2) \sqrt{\text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right)}}{\beta^4}$$

Y para ensanchamiento, si  $\theta \leq 45$  se calcula  $K$  mediante la ecuación 24 y se utiliza ecuación 25 si  $\theta > 45$ :

Ecuación 24. Crane

$$K = \frac{2.6 * \text{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) (1 - \beta^2)^2}{\beta^4}$$

Ecuación 25. Crane

$$K = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4}$$

Finalmente, se suma esta K adicional a la K de los accesorios, y se calculan las pérdidas según se menciona anteriormente [33].

## 4.2 Aislamiento

Debido a que uno de los servicios utilizados en el proceso es el vapor, es necesario utilizar un aislamiento en la tubería con el fin de cumplir con los requerimientos normativos en el uso de este servicio. Para determinar el espesor necesario de aislamiento se utilizó la ecuación de calor [35] que se describe a continuación:

Ecuación 26. Flujo de Calor en Tuberías

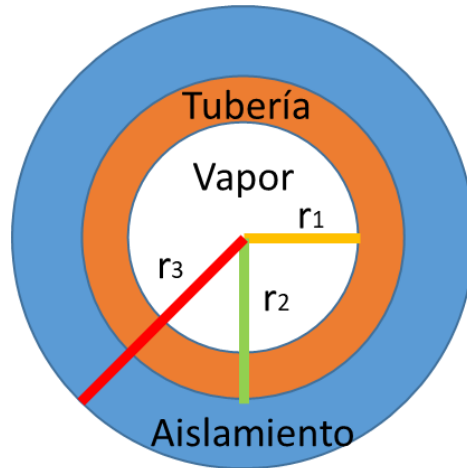
$$\frac{\dot{Q}}{L} = \frac{2 * \pi * (T_f - T_\infty)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{k_T} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{k_A} + \frac{1}{h_{air} * r_3}}$$

La ecuación 26 describe la pérdida de calor que se da entre el vapor que fluye dentro de la tubería respecto al material de la tubería. Este se describe por medio de la conducción expresada en la ecuación como  $k_T$  esta variable se encuentra en las tablas de propiedades dependiendo del tipo de material del que esté construido la tubería; además del calor perdido nuevamente por conducción entre la superficie externa de la tubería y el aislante, está perdida se representa como  $k_A$  y por último la pérdida de calor que hay entre la superficie externa del aislamiento y el aire externo que se describe con  $h_{air}$ .

En la figura 37 se hace una representación de la tubería con el aislante donde se muestran los radios utilizados en la ecuación.

**Figura 37**

*Diagrama en vista frontal de la tubería con recubrimiento.*



**Nota.** Diagrama de vista frontal de la tubería con aislamiento, donde se observan los radios empleados en la ecuación 26.

Para calcular la convección del aire se debe determinar en primera instancia una temperatura media  $T_{film}$  entre la temperatura de la superficie del aislante  $T_s$  y la temperatura del ambiente  $T_\infty$  utilizando la ecuación 27.

Ecuación 27. Temperatura de Pelicula

$$T_{film} = \frac{1}{2}(T_s + T_\infty)$$

Posteriormente, a esta temperatura se determinan las siguientes propiedades: viscosidad cinemática, conductividad térmica y Número de Prandtl. Con el uso de los anteriores parámetros se hallan los números adimensionales de Rayleigh (Ra) y Grashof (Gr) [35] por medio de las ecuaciones 28 y 29.

Ecuación 28. Numero de Grashof

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * D^3}{\nu^2}$$

Ecuación 29. Numero de Rayleigh

$$Ra = Gr * Pr$$

Donde beta representa la relación inversa de  $T_{film}$ , la viscosidad cinemática está representada por  $\nu$  y en número de Prandtl (Pr) se determina con el uso de tablas termodinámicas.

Conociendo estos valores se puede determinar el número de Nusselt [35], utilizando la ecuación 30.

Ecuación 30. Numero de Nusselt convección natural

$$Nu = \left( 0,6 + \frac{0,38 + Ra^{\frac{1}{6}}}{\left[ 1 + \frac{0,559 Pr^{\frac{9}{16}}}{Pr} \right]^{\frac{8}{27}}} \right)^2$$

Lo anterior para convección natural, en donde el medio (aire) se encuentra estático [35]. Para convección forzada, en donde el medio no es estático y presenta una velocidad determinada, se utiliza la siguiente ecuación para Nusselt, en donde Re es Reynolds calculado según la ecuación 8 y Pr es el número de Prandlt [35], que se obtiene de tablas:

Ecuación 31. Numero de Nusselt convección forzada

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62 Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.4}{Pr} \right)^{2/3} \right]^{1/4}} \left[ 1 + \left( \frac{Re}{2800} \right)^{5/8} \right]^{4/5}$$

Por último, se determina el valor de  $h_{air}$  con la ecuación 32.

Ecuación 32. Coeficiente de convección

$$h_{air} = \frac{Nu * k_{air}}{D}$$

Conociendo estos valores, se ingresan en la ecuación 26 y, para determinar el espesor del aislamiento para una pérdida de calor específica, se utiliza el complemento de “buscar objetivo” en Excel fijando un valor de  $\dot{Q}/L$  y variando el mencionado espesor. Por el contrario, si se desea determinar las pérdidas de calor por unidad de longitud, teniendo un espesor de aislante definido, es un proceso directo en el cual se calcula  $h_{air}$  y posteriormente se calcula la ecuación 26.

Es de notar que el valor para la temperatura de la superficie del aislamiento  $T_s$ , es desconocida, varía dependiendo de los demás valores. Para poder llegar a este valor, fundamental para determinar las propiedades a través de  $T_{film}$ , se debe iterar [35]. Como valor inicial se toma la temperatura del vapor, posteriormente se llevan a cabo todos los

cálculos anteriores y conociendo  $\dot{Q}/L$ , se despeja la temperatura, mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 33. Flujo de calor al ambiente

$$T_s = \frac{\dot{Q}/L}{2 * \pi * h_{air} * r_3} + T_\infty$$

### 4.3 Potencia de Bombeo y Presión

Ahora bien, con el fin de determinar la potencia o consumo energético de una bomba colocada en el sistema, se desarrolla el siguiente procedimiento. De la ecuación 2, se despeja el valor de  $h_p$ , resultado la siguiente ecuación:

Ecuación 34. Bernoulli

$$h_p = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + z_2 - z_1 + h_f$$

Se asume flujo altamente turbulento por el efecto de la bomba. Por ende  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  serán iguales a 1.

Con el valor de  $h_p$ , se prosigue a determinar la potencia mediante la siguiente expresión [14]. La cual relaciona el caudal,  $\gamma$  y la eficiencia de la bomba  $\eta$ .

Ecuación 35. Potencia de Bombeo

$$W_p = \frac{h_p * \gamma * Q}{\eta}$$

Por otra parte, si se desea a partir de un valor de potencia de la bomba conocer el valor de la presión a la entrada o a la salida del sistema, mediante un despeje de las dos ecuaciones anteriores se puede lograr.

Ecuación 36. Bernoulli

$$P_2 = P_1 + \gamma \left( \frac{W_p * \eta}{\gamma * Q} - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} - z_2 + z_1 - h_f \right)$$

Ecuación 37. Bernoulli

$$P_1 = P_2 - \gamma \left( \frac{W_p * \eta}{\gamma * Q} - \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} - z_2 + z_1 - h_f \right)$$

Si se desea determinar el caudal, dadas las presiones y la potencia de la bomba; se utiliza una herramienta solver o buscar objetivo. Con el fin de que relacione las ecuaciones 14, 34 y 35, hasta converger en un valor de Q para el cual se tenga el resultado de potencia fijado.

#### **4.4 Consideraciones para Vapor**

Es de tener en cuenta que el vapor es un fluido compresible. Por ende, a diferencia del agua su densidad y demás propiedades varían considerablemente con respecto a la presión. Lo cual implica que la ecuación de Bernoulli tal y como se ha presentado no aplica para este. Pero en cuanto a las metodologías para caudal, diámetro y pérdidas presentadas anteriormente; todas ellas aplican y dan como resultado un valor confiable, partiendo de una buena determinación de las propiedades del vapor previo al desarrollo de la metodología. Esto se debe a que la ecuación de Darcy-Weisbach funciona también para fluidos compresibles según lo presentado en el texto guía “Piping Calculations Manual” de Shashi Menon [14]. Además, los números adimensionales de Reynolds al igual que las ecuaciones de Darcy, Blasius y Colebrook-White para determinar el factor de fricción, funcionan de manera apropiada para vapor [14].

Dado que las metodologías se describen en función del flujo volumétrico o caudal Q, y el vapor usualmente es entregado en unidades másicas, se debe realizar la respectiva conversión con la densidad. Así mismo, el resultado de pérdidas se obtiene en metros del fluido, en este caso vapor. Como la densidad de este es muy baja el resultado tendrá un orden de magnitud elevando; pero al multiplicarse por el peso específico  $\gamma$ , se llegará al valor de pérdidas en unidades de presión, que es totalmente lógico y en ordenes de magnitud apropiados [14].

Es decir, y para concluir este capítulo, todas las metodologías presentadas aplican tanto para fluidos compresibles (como vapor) como incompresibles (como agua de proceso o agua residual). Exceptuando la sección de potencia de bombeo y presión, que es exclusivamente para fluidos incompresibles.

## 5. PROGRAMACIÓN DE LOS SERVICIOS

### 5.1 Herramienta Programada

Como entregable de este trabajo, se pretende el desarrollo de una herramienta de cálculo programa que pueda ser utilizada para diversas aplicaciones, incluida y no solamente restringida al diseño de las tres redes de servicios industriales abordadas para la planta piloto de la Fundación Universidad de América. Se plantea como una herramienta de fácil acceso y múltiples usos para edificios en general, para laboratorios, cualquier tipo de proyecto que implique redes de agua y vapor, bombeo y aislamiento. Que realmente sea utilizada y aporte al crecimiento de la Universidad, aunque igualmente puede ser de ayuda para proyectos externos a ella.

Ahora bien, porque se lleva a cabo en VBA para Microsoft Excel. Debido a que se pretende que la herramienta implique una curva de aprendizaje rápida y sencilla, en donde en un corto periodo de tiempo pueda ser utilizada sin ningún problema y obtener los resultados deseados, a diferencia de diversos softwares donde el proceso de aprendizaje es más lento y puede tomar bastante tiempo para que el usuario “beginner” sea capaz de llegar a resultados reales y confiables. Además, entregar los resultados inmediatamente, a diferencia de varios programas que toman su cierto tiempo de procesamiento.

Alineada con la idea de crear una herramienta que cualquiera pueda usar, se le da relevancia a una interfase amigable con el usuario, donde su diseño sea simple, concreto y funcional; dado que es común y general que, como persona inexperta al ingresar por primera vez a muchos de los softwares comerciales, uno se sienta abatido e intimidado. Siendo importante el factor de las licencias para softwares especializados, en cuanto a tiempo hasta su vencimiento y costos. Como el paquete Office, que casi todos los computadores poseen, tiene acceso a VBA y por supuesto Excel; todo computados y dispositivo puede abrir y utilizar esta herramienta sin ningún inconveniente. Por último, tiene la capacidad de seguir creciendo, agregando nuevas secciones y opciones a futuro, mejorando así su desempeño y utilidad.



En este capítulo se procede a hacer una descripción del proceso de programación de la herramienta de cálculo, la cual permite la esquematización de las redes de vapor, agua residual y agua de proceso para la planta piloto de la Fundación Universidad de América.

### **5.1.1 VBA**

Primero que todo es de vital importancia realizar una contextualización del programa utilizado. VBA son las siglas de Visual Basic for Applications. VBA no debe confundirse con VB, que es el estándar para Visual Basic. Visual Basic for Applications es un elemento de programación diseñado por Microsoft para utilizarse con su paquete de software de Microsoft Office. Específicamente, fue diseñado para usarse principalmente con Excel. VBA es una herramienta que puede usarse para crear programas para ejecutarlos en Excel [36]. Es una herramienta que se encuentra disponible para cualquier persona con acceso a Excel y su lenguaje de programación es amigable con el usuario [36].

### **5.1.2 Generalidades**

La estructura de cálculo está compuesta de diversas partes, cada una con un objetivo específico. La página de inicio cuenta con botones que permiten acceder al cálculo de la variable deseada, ubicada cada una en una hoja del libro Excel. Dentro de estas variables se encuentran: propiedades de los fluidos, diámetro de la tubería, caudal, selección de tubería, aislamiento y potencia de bombeo. Como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 38**

*Página inicio.*



**Nota.** página inicial del libro programado en Excel.

Así mismo, cada uno de los segmentos este compuesto de dos partes o secciones. Una hoja Input que será la utilizada para interactuar con el usuario, allí se ingresan unos valores conocidos como variables de entradas y la hoja entrega la variable desconocida que será el Output solicitado. Además de una o más hojas donde se realizan internamente los cálculos, allí está la ubicación de la información de tablas o demás actividades requeridas.

El movimiento entre cada una de estas secciones está dado por una macro, de código bastante básico y sencillo, asignado a botones cuyo título muestran su acción. Para que lo anterior sea más claro, se prosigue con un ejemplo: en la hoja de inicio, si se desea determinar el diámetro de tubería, será necesario hacer clic en el botón “Calcular Diámetro”, el cual enviará al usuario a la hoja correspondiente al Input para el cálculo del diámetro, mediante el código presentado en la siguiente figura:

### Figura 39

*Código de programación botón calcular diámetro.*

---

```
Option Explicit  
  
Sub ir_diametro()  
  
Sheets("Input Diametro").Select  
  
End Sub
```

---

**Nota.** lenguaje de programación para el botón “calcular diámetro”.

De igual manera, para regresar de una de estas hojas al inicio o moverse a la hoja de propiedades, se utiliza un código similar. Simplemente cambia el nombre de la hoja a la cual se desea ir. Como se identifica en la siguiente figura:

### Figura 40

*Código de programación botón regresar.*

```
Sub regresar()  
  
Sheets("Inicio").Select  
  
End Sub
```

---

**Nota.** lenguaje de programación para el botón “regresar”.

Así mismo, cada sección cuenta con un botón de limpiar, por el cual se dejará vacía y disponible la sección de Input, para agregar nuevos valores y calcular de nuevo la variable deseada. Para ello, se borran los valores en rangos o celdas específicos de la hoja trabajada; según códigos iguales y similares al de la siguiente figura:

## Figura 41

*Código de programación botón regresar.*

```
Sub limpiar()  
  
Range("D1:D13") = Empty  
Range("D15:D100") = Empty  
Range("J12") = Empty  
  
End Sub
```

---

**Nota.** lenguaje de programación para el botón “limpiar”.

### 5.1.3 Propiedades

Como se desarrolló en el capítulo anterior, se evidencia que las propiedades de los fluidos son las causantes de la variación de comportamientos entre los fluidos. Por ende, al entender que las ecuaciones son las mismas para los 3 servicios a tratar, es de vital importancia generar datos certeros para las dos propiedades utilizadas la viscosidad y la densidad. La viscosidad utilizada es la viscosidad cinemática en unidades de Pa\*s, mientras que la densidad estará siempre en kg/m<sup>3</sup>. Dado que estas propiedades varían en función de la temperatura y para el vapor, por ser un fluido compresible en contraposición a los fluidos líquidos, su densidad y viscosidad varían también en función de la presión [32]. La hoja Input para el cálculo de las propiedades se evidencia en la siguiente figura:

**Figura 42**

*Input propiedades.*

The interface consists of several input fields and buttons. On the left, there are five input fields with labels: 'Temperatura (T)' with value '150 °C', 'Presión (P)' with value '1.5 Bar', 'Servicio' with a dropdown menu showing 'Vapor', 'Viscosidad( $\mu$ )' with value '0.000014152 Pa\*s', and 'Densidad( $\rho$ )' with value '0.778644971 kg/m<sup>3</sup>'. To the right of these fields are four buttons: 'CALCULAR DIAMETRO' and 'CALCULAR CAUDAL' are positioned between the Pressure and Service fields; 'CALCULAR PERDIDAS' is between the Viscosity and Density fields; and 'PRESIÓN POTENCIA BOMBA' is to the right of the Viscosity field. At the top right is a button labeled 'INICIO'. At the bottom are two buttons: 'CARGAR PROPIEDADES' and 'LIMPIAR'.

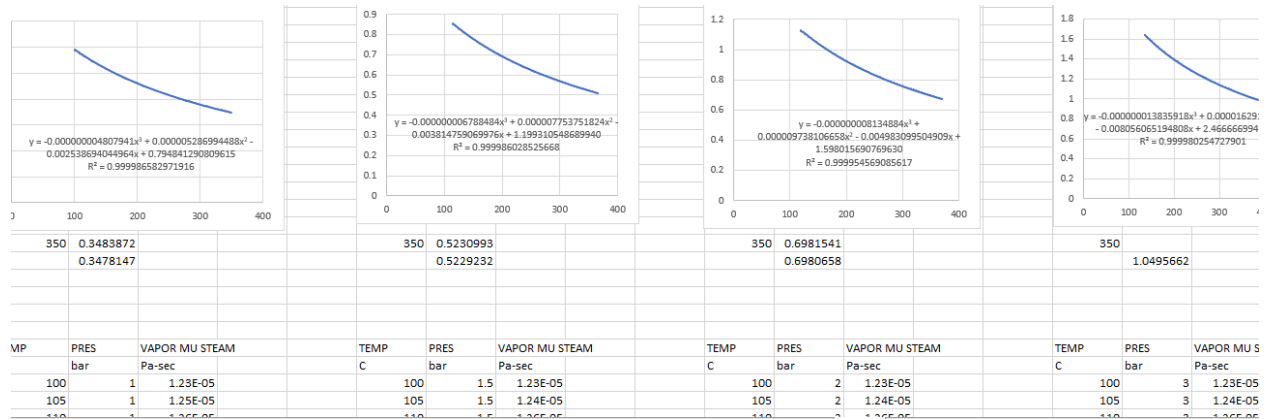
**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para cálculo de viscosidad y densidad.

Los datos de entrada son la Temperatura en °C, la presión en Bar y el servicio (Vapor, Agua de proceso o Agua Residual). Y se entrega como resultado los valores de las propiedades indicadas.

Ahora bien, cómo se realiza este cálculo. Mediante la recolección de datos de ASPEN PLUS [37], enlazado a la base de datos del NIST, se realiza una tabulación de la densidad y viscosidad de los diferentes fluidos a varias temperaturas y presiones [38]. A partir de esos datos, se realizan regresiones polinómicas de diferente orden. Con el fin de que el Factor R de la regresión sea los más cercano a 1, en función de que la ecuación resultante entregue valores de viscosidad o densidad certeros. Estas regresiones se desarrollaron en la hoja alterna a "Input prop", que tiene por nombre "prop". Una vista de esta hoja es presentada a continuación:

**Figura 43**

Hoja documento Excel: "prop".



**Nota.** hoja alterna para cálculo de propiedades.

Mediante condicionales por los valores de entrada, se utiliza la regresión apropiada para cada caso y genera el Output. Posteriormente, se realiza la acción del botón "Cargar Propiedades". El cual desencadena una macro que lleva los valores de Viscosidad y Densidad a las hojas que los requieran para su cálculo. El código para esta acción puede verse en la siguiente figura:

**Figura 44**

Código botón "cargar propiedades".

```
Sub cargar_prop()
Sheets("Input Caudal").Range("D11") = Sheets("Input Prop").Range("D13")
Sheets("Input Diametro").Range("D11") = Sheets("Input Prop").Range("D13")
Sheets("Input Perdidas").Range("D3") = Sheets("Input Prop").Range("D13")
Sheets("Input Caudal").Range("D13") = Sheets("Input Prop").Range("D15")
Sheets("Input Diametro").Range("D13") = Sheets("Input Prop").Range("D15")
Sheets("Input Perdidas").Range("D2") = Sheets("Input Prop").Range("D15")
Sheets("Input PBomba").Range("D2") = Sheets("Input Prop").Range("D15")

limpiar_prop

End Sub
```

**Nota.** lenguaje de programación para el botón "cargar propiedades".

El código anterior, bastante simple, hace que las celdas de las hojas Input para cálculo de Diámetro, Caudal, Perdidas y Potencia de Bombeo sean iguales a las celdas resultantes de Viscosidad y Densidad de esta hoja de propiedades. Luego, realiza una

acción de limpieza con un código enlazado y similar al presentado en subcapítulos anteriores.

### 5.1.4 Caudal

Para el cálculo del caudal es necesario contar como variables de entrada el diámetro interno de la tubería, la longitud de la sección, la pérdida de carga, la rugosidad de la tubería, la sumatoria de factores L/D de Crane para los accesorios y por supuesto, las propiedades del fluido. Para ello, la hoja de Input se desarrolla según la figura siguiente:

**Figura 45**

*Input caudal.*

		<input type="button" value="PROPIEDADES"/>	<input type="button" value="INICIO"/>
<b>Diametro (D)</b>	<input type="text"/>	<input type="button" value="CALCULAR CAUDAL"/>	
<b>Longitud(L)</b>	<input type="text"/>		
<b>Perdida de Carga (hf)</b>	<input type="text"/>		
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<input type="text"/>	<b>Caudal (Q)</b>	<input type="text"/>
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<input type="text"/>		<b>m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Rugosidad(<math>\epsilon</math>)</b>	<input type="text"/>	<input type="button" value="LIMPIAR"/>	
<b>Tabla <math>\Sigma</math>L/D Accesorios Crane</b>	<input type="text"/>		

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para cálculo de caudal.

Los datos de diámetro, longitud, pérdidas de carga y rugosidad, deben suministrarse manualmente. La viscosidad y densidad del fluido, puede anclarse mediante a la hoja de propiedades explicada anteriormente o también ingresarse de manera manual. Y para los factores de Crane, mediante la incorporación de un UserForm, vinculado al botón “Tabla”, se despliega la tabla de Crane para que el usuario obtenga los valores de los accesorios que posee y así ingrese la sumatoria. Dicho UserForm, se muestra en la siguiente figura:

**Figura 46**

*Factor de Crane para accesorios.*

Accesorios	factor L/D	Accesorios	factor L/D	Accesorios	factor L/D
Codo Estándar 90°	30	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=0^\circ$	2	Válvulas De Macho y Llaves Paso Directo	18
Codo Estándar 45°	16	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=15^\circ$	4	Válvulas De Macho y Llaves Tres Entradas 180°	30
Curvas 180° radio corto	50	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=30^\circ$	8	Válvulas De Macho y Llaves Tres Entradas 90°	90
Conexión estándar T flujo directo	60	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=45^\circ$	15	Válvulas de Compuerta	8
Conexión estándar T flujo Desviado 90°	60	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=60^\circ$	25	Válvulas de Retención de Disco Oscilante en Y	100
Curvas y Codos 90° r/d=1	20	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=75^\circ$	40	Válvulas de Retención de Disco Oscilante	50
Curvas y Codos 90° r/d=1.5	14	Curvas en Escuadra o Falsa Escuadra $\alpha=90^\circ$	60	Válvulas de Globo	340
Curvas y Codos 90° r/d=2	12	Salidas Con resalte	1	Válvulas de Angular	55
Curvas y Codos 90° r/d=3	12	Salidas de Cantos Vivos	1	Válvulas de Angular 90°	150
Curvas y Codos 90° r/d=4	14	Salidas Redondeada	1	Válvula de Retención y Cierre Tipo Recto 1	400
Curvas y Codos 90° r/d=6	17	Entrada con resalte hacia el interior	0.78	Válvula de Retención y Cierre Tipo Recto 2	300
Curvas y Codos 90° r/d=8	24	Entrada de tubería a tope r/d=0	0.5	Válvula de Retención y Cierre Tipo Recto 3	55
Curvas y Codos 90° r/d=10	30	Entrada de tubería a tope r/d=0.02	0.28	Válvula de Retención y Cierre Tipo Rectangular 1	200
Curvas y Codos 90° r/d=12	34	Entrada de tubería a tope r/d=0.04	0.24	Válvula de Retención y Cierre Tipo Rectangular 2	350
Curvas y Codos 90° r/d=14	38	Entrada de tubería a tope r/d=0.06	0.15	Válvula de Retención y Cierre Tipo Rectangular 3	55
Curvas y Codos 90° r/d=16	42	Entrada de tubería a tope r/d=0.10	0.09	Válvula Mariposa D entre 50 mm a 200 mm	45
Curvas y Codos 90° r/d=20	50	Entrada de tubería a tope r/d=0.15	0.04	Válvula Mariposa D entre 250 mm a 350 mm	35
				Válvula Mariposa D entre 400 mm a 600 mm	25

**Nota.** Ventana del botón “tabla” de los factores L/D de Crane para accesorios.

Al tener los valores para las variables Input completos, se procede a oprimir el botón “Calcular Caudal”; mediante el cual se ejecuta una macro que transfiere todos los datos a la hoja alterna y transfiere el caudal respuesta a la hoja que es visualizada por el usuario. Ahora bien, para obtener el resultado se programa una función que enmarca las ecuaciones de la 4 a la 14 y el procedimiento de cálculo mostrado en el capítulo 4.1.1. Siendo el código para esa función el presentado en seguida:



## Figura 47

### Código para el cálculo de caudal.

```
Function Flujo(p As Double, v As Double, hf As Double, L As Double, D As Double, e As Double, k As Double) As Double
Dim f As Double, Re As Double, Q As Double, fo As Double, df As Double, ff As Double, dff As Double, Vel As Double
f = 0.1
Do
    fo = f
    Vel = (((2 * 9.81 * hf) / ((f * ((L / D) + k)))) ^ (0.5)
    Re = (p * Vel * D) / v
    If Re < 2100 Then
        f = 64 / Re
    ElseIf Re < 4000 Then
        f = 0.3164 * Re ^ (-0.25)
    Else
        Do
            ff = f
            f = (1 / (-2 * WorksheetFunction.Log10((e / (3.7 * D)) + (2.51 / (Re * (f ^ (1 / 2))))))) ^ 2
        Loop
        dff = Abs(f - ff)
        If dff < 0.000000001 Then Exit Do
    Loop
    End If
    df = Abs(f - fo)
    If df < 0.000000001 Then Exit Do
Loop
Vel = ((2 * 9.81 * hf) / ((f * ((L / D) + k)))) ^ (0.5)
Flujo = Vel * WorksheetFunction.Pi() * D ^ 2 * 3600 / 4
End Function
```

**Nota.** lenguaje de programación para el cálculo de caudal.

Mediante la utilización de una herramienta conocida como “Do-Loop”, que permite repetir una acción hasta que se cumple una condición, se llevan a cabo las iteraciones presentadas en la metodología de cálculo. Una específica, para obtener el factor de fricción cuando el régimen es turbulento, mediante la ecuación de Colebrook-White, hasta una toleración de 0.000000001. Y otra general, que calcula Reynolds, velocidad y factor de fricción en secuencias repetitivas, hasta una tolerancia similar.

### 5.1.5 Diámetro

Ahora bien, para determinar el diámetro interno de una tubería, que a un flujo específico presente una pérdida de carga fija, se deben incluir como variables de entrada la longitud del tramo de tubería, las propiedades del fluido (viscosidad y densidad), la rugosidad de la tubería de acuerdo con el material de esta y obviamente, el caudal y pérdidas. Para ello la hoja de interfaz con el usuario tiene la siguiente forma:

**Figura 48**

*Input diámetro.*

<b>Caudal (Q)</b>	<input type="text"/>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>	<b>PROPIEDADES</b>	<b>INICIO</b>
<b>Longitud(L)</b>	<input type="text"/>	<b>m</b>	<b>CALCULAR DIAMETRO</b>	
<b>Perdida de Carga (hf)</b>	<input type="text"/>	<b>m</b>	<b>Diametro (D)</b>	<input type="text"/>
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<input type="text"/>	<b>Pa*s</b>	<b>LIMPIAR</b>	
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<input type="text"/>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>		
<b>Rugosidad(<math>\epsilon</math>)</b>	<input type="text"/>	<b>m</b>		

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para cálculo de diámetro de tubería.

De igual manera que para el cálculo del caudal, la longitud, el  $h_f$  y la rugosidad se ingresan manualmente. Las propiedades se pueden ingresar manual o ir a la sección de propiedades para calcularlas y cargarlas. En este caso, el dato del caudal es Input. Al tener completos estos datos, el resultado aparece en la casilla “Diámetro (D)” al oprimir el botón “Calcular Diámetro”. Este botón ejecuta una macro que envía los datos del Input a la hoja alterna de cálculos “Diámetro”.

En la hoja de cálculos, se utiliza una función programada que fue nombrada “Diameter”. Esta función realiza el procedimiento explicado en el capítulo 4.1.2 y engloba las ecuaciones 5, 8, 9, 10, 12 y 15. El resultado de esa función, posteriormente es enviado a la Hoja que el usuario está observando, en la casilla correspondiente a la respuesta. El código para la función utilizada es presentado en la figura siguiente:

## Figura 49

Código para el cálculo de diámetro.

---

```
Option Explicit

Function Diameter(p As Double, v As Double, hf As Double, L As Double, Q As Double, e As Double) As Double
Dim f As Double, Re As Double, D As Double, fo As Double, df As Double, ff As Double, dff As Double

f = 0.1

Do
fo = f

D = ((0.0826 * f * L * ((Q / 3600) ^ 2)) / (hf)) ^ (1 / 5)

Re = (4 * p * (Q / 3600)) / (WorksheetFunction.Pi() * v * D)

If Re < 2100 Then

f = 64 / Re

ElseIf Re < 4000 Then

f = 0.3164 * Re ^ (-0.25)

Else

Do
ff = f

f = (1 / (-2 * WorksheetFunction.Log10((e / (3.7 * D)) + (2.51 / (Re * (f ^ (1 / 2)))))) ^ 2

dff = Abs(f - ff)

If dff < 0.000000001 Then Exit Do

Loop

End If

df = Abs(f - fo)

If df < 0.000000001 Then Exit Do

Loop

D = ((0.0826 * f * L * ((Q / 3600) ^ 2)) / (hf)) ^ (1 / 5)

Diameter = D
End Function
```

---

**Nota.** lenguaje de programación para el cálculo de diámetro de tubería.

De igual manera que para el código del caudal, la herramienta “Do-Loop” es la clave para el desarrollo de las iteraciones, una para el factor de fricción y otra para el método en sí. Con el fin de la convergencia al Diámetro de la tubería con una tolerancia de  $1 \times 10^{-9}$ .

### 5.1.6 Pérdida de Carga

A diferencia de los dos casos anteriores, Diámetro y Caudal, el proceso para determinar las pérdidas de presión o carga ( $h_f$ ) de la red, no es iterativo sino directo. Se deben ingresar como *Input*: el caudal, las propiedades del fluido (densidad y viscosidad) que pueden ser cargadas mediante el uso de la sección de propiedades, características de las tuberías (diámetro, longitud, rugosidad) y se debe tener en cuenta los diferentes accesorios que pueden hacer parte del sistema de tuberías; así como los cambios de diámetro de una sección a la otra. Con el fin de obtener esta información y entregar el resultado, se utiliza la hoja mostrada en la siguiente figura:

**Figura 50**

*Input pérdidas.*

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para cálculo de pérdidas.

Para esta sección se cuenta con dos hojas alternas de cálculo, nombradas “Tabla  $h_f$ ” y “Pérdidas accesorios” y la hoja de interacción con el usuario, cuyo nombre es “Input Pérdidas”. En este caso, la herramienta permite calcular toda la red de manera unificada, al igual que por secciones.

En la hoja “Pérdidas accesorios” se presenta la tabla de Crane para los accesorios junto con sus factores L/D. Esta tabla está enlazada a una lista desplegable que el usuario puede observar y seleccionar en la hoja de Input (figura anterior). Mediante los botones “Agregar Accesorios” y “Quitar Accesorios” se selecciona cuáles y cuántos

accesorios lleva la sección de la tubería. Estas cantidades son transferidas a la tabla mediante códigos parecidos a los siguientes:

### Figura 51

*Código para adicionar accesorios.*

```
Sub adicionar_accesorios()
If Sheets("Input Perdidas").Range("D13") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("F4") Then
    Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I4") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I4") + 1
ElseIf Sheets("Input Perdidas").Range("D13") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("F5") Then
    Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I5") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I5") + 1
```

**Nota.** lenguaje de programación para adicionar accesorios.

### Figura 52

*Código para eliminar accesorios.*

```
Sub quitar_accesorios()
If Sheets("Input Perdidas").Range("D13") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("F4") Then
    Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I4") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I4") - 1
ElseIf Sheets("Input Perdidas").Range("D13") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("F5") Then
    Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I5") = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I5") - 1
```

**Nota.** lenguaje de programación para eliminar accesorios.

Además, en esta misma hoja se realizan los cálculos para determinar el factor de fricción, y determinar la K de los accesorios, según la metodología expuesta en el capítulo 4.1.3.

Como segunda hoja alterna de cálculos, se tiene una tabla, a la cual llegan todos los datos y valores necesarios para obtener la pérdida de carga definitiva del sistema ingresado. Dicha tabla presenta los siguientes encabezados:

### Figura 53

*Encabezado de tabla para cálculo de pérdidas.*

Tipo	Caudal(Q)	Longitud(L)	Diametro(D)	Viscosidad(v)	Densidad(p)	Rugosidad(e)	velocidad(vel)	Reynolds(Re)	Factor de Friccion(ff)	Angulo	Dmenor	Dmayor	$\beta$	k	Perdidas (hf)
------	-----------	-------------	-------------	---------------	-------------	--------------	----------------	--------------	------------------------	--------	--------	--------	---------	---	---------------

**Nota.** Hoja alterna para cálculo de pérdidas con los valores requeridos.

En donde el tipo será: Tubería, Válvula, Ensanchamiento o Estrechamiento. El caudal, longitud, diámetro, viscosidad, densidad, rugosidad; serán trasferidos desde la hoja de Input. Se calculará la velocidad y el Reynolds según las ecuaciones previas al igual que el factor de fricción. Para los cambios de diámetro los valores de Ángulo, diámetro menor y diámetro mayor también son trasladados, mientras que  $\beta$  y k para ensanchamiento y estrechamiento también se calculan según lo propuesto en las ecuaciones 21 a 25. Para válvulas, el valor de la sumatoria de K para accesorios, determinada anteriormente, se transfiere a ese espacio. Con el fin de llevar a cabo todas estas acciones, se programa el botón “Agregar” con el siguiente código:

## Figura 54

*Código para el cálculo de pérdidas.*

```
Sub agregar_perdidas()
Dim c As Integer

c = 1
Do

If Sheets("tabla hf").Range("A" & c) = Empty Then Exit Do
c = c + 1

Loop

'tuberia
Sheets("tabla hf").Range("A" & c) = "Tuberia"
Sheets("tabla hf").Range("B" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D4")
Sheets("tabla hf").Range("C" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D8")
Sheets("tabla hf").Range("D" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D9")
Sheets("tabla hf").Range("E" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D3")
Sheets("tabla hf").Range("F" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D2")
Sheets("tabla hf").Range("G" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D10")

'valvula
c = c + 1

Sheets("tabla hf").Range("A" & c) = "Valvula"
Sheets("tabla hf").Range("B" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D4")
Sheets("tabla hf").Range("C" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D8")
Sheets("tabla hf").Range("D" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D9")
Sheets("tabla hf").Range("E" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D3")
Sheets("tabla hf").Range("F" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D2")
Sheets("tabla hf").Range("G" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D10")

```

```

Sheets("tabla hf").Range("O" & c) = Sheets("Perdidas Accesorios").Range("J57")

Sheets("Perdidas Accesorios").Range("I4:I57") = ""

'cambio diametro
c = c + 1

Sheets("tabla hf").Range("A" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D17")
Sheets("tabla hf").Range("B" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D4")
Sheets("tabla hf").Range("C" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D8")
Sheets("tabla hf").Range("D" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D9")
Sheets("tabla hf").Range("E" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D3")
Sheets("tabla hf").Range("F" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D2")
Sheets("tabla hf").Range("G" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D10")

Sheets("tabla hf").Range("K" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D18")
Sheets("tabla hf").Range("L" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D19")
Sheets("tabla hf").Range("M" & c) = Sheets("Input perdidas").Range("D20")
limpiar

```

End Sub

---

**Nota.** lenguaje de programación para el cálculo de pérdidas.

Luego de hacer clic en “Agregar”, los espacios quedarán vacíos para ingresar otro segmento de tubería si se desea. Si no, al clicar “Calcular”, se traerá la sumatoria de todas las pérdidas cargadas hasta el momento.

### **5.1.7 Selección de Tubería**

Con el fin de obtener una sugerencia del tipo de tubería más apropiada para el contexto de su uso y sus características, se lleva a cabo el trabajo de esta sección. En donde, por medio del ingreso del servicio, el material y el diámetro (que puede ser obtenido de la utilización de la sección descrita en el capítulo 5.1.5), se entrega como Output el diámetro nominal, diámetro interno, diámetro externo, peso, calibre y espesor de la tubería sugerida. La figura a continuación muestra la hoja de interfaz con el usuario correspondiente:

**Figura 55**

Input selección.

<b>Servicio</b>	<input type="text"/>	<b>Diametro Nominal</b>	<input type="text"/> mm <input type="text"/> in	<input type="button" value="INICIO"/>
<b>Diametro(D)</b>	<input type="text"/> mm	<b>Diametro Interno(DI)</b>	<input type="text"/> mm	
<b>Recomendación</b>	<input type="text"/>	<b>Diametro Externo(DE)</b>	<input type="text"/> mm	
<b>Material</b>	<input type="text"/>	<b>Calibre</b>	<input type="text"/>	
	<input type="button" value="SELECCION"/>	<b>Peso</b>	<input type="text"/> kg/m	
	<input type="button" value="LIMPIAR"/>	<b>Espesor</b>	<input type="text"/> mm	

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para seleccionar la tubería.

La selección del material de la tubería se da en función del tipo de fluido que pasa a través de esta. Las recomendaciones fueron presentadas en el capítulo 2.4. En la hoja alterna llamada "Pipe", se tiene la base de datos de las tuberías y es donde se busca y trae la información relacionada a los diámetros, el calibre o Schedule, espesor y peso [39], [40]. Esta hoja se ve como en la figura siguiente:



**Figura 56**

Hoja alterna "pipe".

Nominal size		OD	Schedule	Espesor	Peso	ID
in	mm	mm	ASME	mm	kg/m	mm
1/8	6	10.3	10 10S	1.24	0.28	7.82
1/8	6	10.3	STD 40 40S	1.73	0.37	6.84
1/8	6	10.3	XS 80 80S	2.41	0.47	5.84
1/4	8	13.7	10 10S	1.65	0.49	10.4
1/4	8	13.7	STD 40 40S	2.24	0.63	9.22
1/4	8	13.7	XS 80 80S	3.02	0.8	7.66
3/8	10	17.1	10 10S	1.65	0.63	13.8
3/8	10	17.1	STD 40 40S	2.31	0.84	12.48
3/8	10	17.1	XS 80 80S	3.2	1.1	10.7
1/2	15	21.3	5 5S	1.65	0.8	18
1/2	15	21.3	10 10S	2.11	1	17.08
1/2	15	21.3	STD 40 40S	2.77	1.27	15.76
1/2	15	21.3	XS 80 80S	3.73	1.62	13.84
1/2	15	21.3	160	4.78	1.95	11.74
1/2	15	21.3	XX	7.47	2.55	6.36
3/4	20	26.7	5 5S	1.65	1.03	23.4
3/4	20	26.7	10 10S	2.11	1.28	22.48
3/4	20	26.7	STD 40 40S	2.87	1.69	20.96
3/4	20	26.7	XS 80 80S	3.91	2.2	18.88
3/4	20	26.7	160	5.56	2.9	15.58
3/4	20	26.7	XX	7.82	3.64	11.06

**Nota.** Hoja con la información de la tubería. Tomado de: ASAHI AV, "PP Pipe & Fittings Ecology," 2019, y Tioga, "Pipe dimensions and weights," Mena Report, 2015.

Para obtener los Outputs al oprimir el botón "Selección", se desencadena la macro descrita en el siguiente código:

## Figura 57

### Código para la selección de tubería.

```
Sub seleccion()  
Dim i As Integer, c As Integer, D As Double, dif As Double, dif2 As Double  
  
If Sheets("Input Seleccion").Range("D10") = Sheets("Pipe").Range("A1") Then  
  
    D = Sheets("Input Seleccion").Range("D6")  
    i = 5  
    dif2 = 1000  
    Do  
    If Sheets("Pipe").Range("B" & i) = Empty Then Exit Do  
        dif = Abs(Sheets("Pipe").Range("H" & i) - D)  
        If dif < dif2 And Sheets("Pipe").Range("H" & i) >= D Then  
            c = i  
            dif2 = dif  
        End If  
  
        i = i + 1  
    Loop  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J6") = Sheets("Pipe").Range("C" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J7") = Sheets("Pipe").Range("B" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J9") = Sheets("Pipe").Range("H" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J11") = Sheets("Pipe").Range("D" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J13") = Sheets("Pipe").Range("E" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J15") = Sheets("Pipe").Range("G" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J17") = Sheets("Pipe").Range("F" & c)  
  
ElseIf Sheets("Input Seleccion").Range("D10") = Sheets("Pipe").Range("A4") Then  
  
    D = Sheets("Input Seleccion").Range("D6")  
    i = 5  
    dif2 = 1000  
    Do  
    If Sheets("Pipe").Range("R" & i) = Empty Then Exit Do  
        dif = Abs(Sheets("Pipe").Range("X" & i) - D)  
        If dif < dif2 And Sheets("Pipe").Range("X" & i) > D Then  
            c = i  
            dif2 = dif  
        End If  
  
        i = i + 1  
    Loop  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J6") = Sheets("Pipe").Range("S" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J7") = Sheets("Pipe").Range("R" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J9") = Sheets("Pipe").Range("X" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J11") = Sheets("Pipe").Range("T" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J13") = Sheets("Pipe").Range("U" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J15") = Sheets("Pipe").Range("W" & c)  
    Sheets("Input Seleccion").Range("J17") = Sheets("Pipe").Range("V" & c)  
  
End If  
End Sub
```

**Nota.** lenguaje de programación para la selección de la tubería.

Mediante el uso de condicionales, se ingresa a la sección de la base de datos que corresponde al material de la tubería apropiado para el fluido que transporta.

Posteriormente, la macro empieza a comparar el diámetro ingresado por el usuario con cada una de las opciones de la base de datos, guardando el número de la fila que genera la menor diferencia. Con esto, lo último es copiar los valores de la fila guardada en la hoja que ve el usuario.

### 5.1.8 Aislamiento

Para el cálculo de pérdidas de calor y aislamiento requerido, se utiliza la siguiente hoja Input para obtener los datos necesarios:

**Figura 58**

*Input aislante.*

<b>Temperatura Fluido</b>	<input type="text"/>	°C		<b>INICIO</b>
<b>Temperatura Ambiente</b>	<input type="text"/>	°C	<b>Espesor Aislante</b>	<input type="text"/>
<b>Diametro</b>	<input type="text"/>	m		<b>CALCULAR AISLANTE</b>
<b>Tuberia</b>	<input type="text"/>			
<b>Espesor Tuberia</b>	<input type="text"/>	m	<b>Calor Perdido</b>	<input type="text"/>
<b>Aislante</b>	<input type="text"/>			kW/m
			<b>LIMPIAR</b>	<b>CALCULAR CALOR</b>

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para el cálculo del espesor del aislante.

En la cual se ingresa la temperatura del fluido que pasa a través de la tubería (estos cálculos se emplean principalmente para las líneas de vapor), la temperatura ambiente, el diámetro interno de la tubería, qué tipo de tubería es de acuerdo con su porcentaje de carbono, el espesor de la tubería y qué tipo de aislante se utiliza.

En la hoja alterna de cálculo, nombrada “Aislamiento”, se utilizan las ecuaciones de la 26 a la 33, siguiendo la metodología o procedimiento de cálculo explicado en el capítulo 4.2. Si se desea determinar la pérdida de calor por unidad de longitud, se debe ingresar el espesor del aislante, y el cálculo es directo. Al seleccionar el botón “Calcular

Calor”, se ejecuta una macro, que simplemente copia el valor del espesor para el aislante en la hoja de cálculo y trae el valor resultado a la celda “Calor Perdido”. El código se ve en la siguiente figura:

### Figura 59

*Código cálculo de calor.*

```
Sub Calor()  
  
Sheets("Aislamiento").Range("C22") = Range("I5")  
Range("I14") = Sheets("Aislamiento").Range("C24")  
  
End Sub
```

---

**Nota.** lenguaje de programación para el cálculo de calor.

En caso contrario, donde se dese conocer el espesor requerido de aislante para tener una pérdida de calor determinada, se ingresa el valor de “Calor Perdido” y selección el botón “Calcular Aislante”. Se ejecuta una macro, que utiliza la herramienta *Goal/Seek* o Buscar Objetivo, para encontrar el espesor que genera como salida la pérdida de calor deseada. El código para esta macro se muestra a continuación:

### Figura 60

*Código espesor aislante.*

```
Sub Aislante()  
Dim x As Double  
x = Range("I14")  
Sheets("Aislamiento").Range("L8").GoalSeek goal:=x, ChangingCell:=Sheets("Aislamiento").Range("L9")  
Range("I5") = Sheets("Aislamiento").Range("L9")  
  
End Sub
```

**Nota.** lenguaje de programación para el cálculo del espesor del aislante.

Además, cabe resaltar que el cálculo iterativo para obtener  $T_s$  y con ella  $T_{film}$ , se realiza mediante dos tablas similares en la hoja alterna de cálculos. Una de estas tablas se puede observar en la figura a continuación.

**Figura 61**

*Hoja de iteraciones.*

Ts	Tfilm	v	k	Pr	$\beta$	Gr	Ra	Nu	h air	Q/L	Tolerancia
130.00	71.00	0.00	0.03	0.72	0.00	2868414.40	2058276.58	17.86	7.37	190.85	
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.00	2057374.61	17.86	7.37	190.77	7.96E-02
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	3.32E-05
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.39E-08
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.83E-12
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	5.68E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	8.53E-14
129.76	70.88	0.00	0.03	0.72	0.00	2867045.58	2057374.98	17.86	7.37	190.77	1.42E-13

**Nota.** hoja alterna para la determinación de Tfilm por medio de iteraciones.

### 5.1.9 Potencia de Bombeo y Presión

Para esta sección, se tienen dos hojas: una de Input y otra donde se llevan a cabo todos los cálculos. Estos cálculos se realizan según la metodología del capítulo 4.3. La hoja Input luce de la siguiente manera:

**Figura 62**

*Input “P Bomba”.*

<b>Densidad</b>	<input type="text"/>	kg/m <sup>3</sup>	<input type="button" value="PROPIEDADES"/>	<input type="button" value="INICIO"/>
<b>Presión Entrada</b>	<input type="text"/>	bar		
<b>Presión Salida</b>	<input type="text"/>	bar	<input type="button" value="CALCULAR POTENCIA DE BOMBEO"/>	<input type="button" value="CALCULAR CAUDAL DE BOMBEO"/>
<b>Diametro Punto 1</b>	<input type="text"/>	m		
<b>Diametro Punto 2</b>	<input type="text"/>	m	<input type="button" value="CALCULAR PRESIÓN DE ENTRADA"/>	<input type="button" value="CALCULAR PRESIÓN DE SALIDA"/>
<b>Altura Punto 1</b>	<input type="text"/>	m		
<b>Altura Punto 2</b>	<input type="text"/>	m		
<b>Caudal</b>	<input type="text"/>	m <sup>3</sup> /h		
<b>Perdidas de Carga h<sub>L</sub></b>	<input type="text"/>	m		
<b>Potencia de Bombeo</b>	<input type="text"/>	W	<b>Eficiencia</b> <input type="text"/>	<input type="button" value="LIMPIAR"/>

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para los cálculos referentes a la bomba.

El valor de la densidad se puede ingresar manualmente o cargarse a través de la sección de propiedades. Las demás variables se deben especificar en función de lo que se desea calcular. Para Calcular la Potencia, se debe ingresar todo menos la casilla “Potencia de Bombeo”. De igual manera, para los cálculos de presión de entrada, presión de salida o caudal de bombeo, dejando el espacio que se quiera calcular, vacío. Al seleccionar los botones “Calcular Potencia de Bombeo”, “Calcular Presión de Entrada” o “Calcular Presión de Salida”; se desencadena una macro bastante sencilla que transfiere los resultados desde la hoja de cálculo. En el caso de seleccionar “Calcular Caudal de Bombeo”, la macro es un poco más compleja, ya que procede a realizar la acción de buscar objetivo y después el resultado lo envía a la hoja de interfaz con el usuario. El código para ello es el siguiente:

### Figura 63

*Código para los cálculos referentes a la bomba.*

```
Sub potencia_bombeo()  
  
Sheets("Input PBomba").Range("D20") = Sheets("PBomba").Range("C21")  
  
End Sub  


---

  
Sub presion1()  
  
Sheets("Input PBomba").Range("D4") = Sheets("PBomba").Range("G20")  
  
End Sub  


---

  
Sub presion2()  
  
Sheets("Input PBomba").Range("D6") = Sheets("PBomba").Range("K20")  
  
End Sub  


---

  
Sub caudal_bombeo()  
  
Sheets("PBomba").Range("N22").GoalSeek goal:=0, ChangingCell:=Sheets("PBomba").Range("N9")  
  
Sheets("Input PBomba").Range("D16") = Sheets("PBomba").Range("N9")  
|  
End Sub
```

**Nota.** lenguaje de programación para los cálculos referentes a la bomba.

Los botones de “Limpiar”, “Propiedades” e “Inicio” fueron programados de manera similar a los de las secciones anteriores.

## 5.2 Validación de la Herramienta

Con el fin de confirmar el funcionamiento apropiado de la herramienta programada y garantizar veracidad en los resultados que genera, se selecciona un ejercicio de uno de los textos guía “Piping Calculations Manual” [14], se resuelve con la herramienta y comparan los resultados obtenidos. El ejercicio por resolver es el Ejemplo 1.10 que se muestra a continuación:

**“Ejemplo 1.10** Una tubería de concreto (2m de diámetro interno) es usada para transportar agua desde una instalación de bombeo hacia un tanque a 5 km de distancia. Ignorando cualquier diferencia de elevación, calcular el factor de fricción y pérdida de presión debido a la fricción a una tasa de flujo de 34000 m<sup>3</sup>/h. asuma una rugosidad de la tubería de 0.05mm.”[14]

Debido a las características del ejercicio, para el cálculo de las propiedades se establece una presión de 3 Bar y una temperatura de 30°C. Siendo los valores de densidad y viscosidad cinemática los mostrados en la siguiente figura:

**Figura 64**

*Input propiedades.*

<b>Temperatura (T)</b>	<input type="text" value="30"/> °C
<b>Presión (P)</b>	<input type="text" value="3"/> Bar
<b>Servicio</b>	<input type="text" value="Agua de Proceso"/>
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<input type="text" value="0.000796281"/> Pa*s
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<input type="text" value="995.807825300"/> kg/m <sup>3</sup>

**Nota.** hoja de interfaz con el usuario para el cálculo de viscosidad y densidad.

Se cargan estas propiedades y se prosigue con el cálculo de las pérdidas. En la siguiente figura, se evidencia los valores ingresados:

**Figura 65**

*Input pérdidas.*

<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<b>995.8078253</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<b>7.96E-04</b>	<b>Pa*s</b>
<b>Caudal (Q)</b>	<b>34000</b>	<b>m<sup>3</sup>/h</b>
<b>Longitud(L)</b>	<b>5000</b>	<b>m</b>
<b>Diametro (D)</b>	<b>2</b>	<b>m</b>
<b>Rugosidad(<math>\epsilon</math>)</b>	<b>5.00E-05</b>	<b>m</b>

**Nota.** Variables de entrada para cálculo de pérdidas.

Dando como resultado 11.534193 m para las pérdidas en metros de fluido. Un valor casi igual al resultado entregado por el libro guía, de 11.54 m. Estos valores no son idénticos debido a las aproximaciones que lleva a cabo el texto guía. En la siguiente figura se puede ver ambas respuestas:

**Figura 66**

Comparación de resultados.

**Perdida de Carga (hf)** **11.534193** m

$$h = 0.01 \frac{5000}{2.0} \frac{3.01^2}{2 \times 9.81} = 11.54 \text{ m of head of water}$$

**Nota.** comparación de los resultados obtenidos de pérdidas respecto a la hoja programada y el libro guía.

Para verificar el cálculo del diámetro y caudal, se utiliza el mismo ejemplo cambiando las variables conocidas y desconocidas. Para el caudal, como Input se



ingresa el valor de las perdidas 11.534193 m; y el resultado debe ser 34000 m<sup>3</sup>/h. Tal y como se evidencia en la siguiente figura:

**Figura 67**

*Resultado de caudal por la herramienta.*

<b>Diametro (D)</b>	<input type="text" value="2"/> m	<b>CALCULAR CAUDAL</b>
<b>Longitud(L)</b>	<input type="text" value="5000"/> m	
<b>Perdida de Carga (hf)</b>	<input type="text" value="11.534193"/> m	
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<input type="text" value="7.96E-04"/> Pa*s	<b>Caudal (Q)</b> <input type="text" value="33999.999"/> m <sup>3</sup> /h
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<input type="text" value="995.80783"/> kg/m <sup>3</sup>	
<b>Rugosidad(<math>\epsilon</math>)</b>	<input type="text" value="0.00005"/> m	
<b>Tabla <math>\Sigma L/D</math> Accesorios Crane</b>	<input type="text" value="0"/>	
		<b>LIMPIAR</b>

**Nota.** resultado obtenido de caudal por medio de la herramienta programada.

Del mismo modo, se valida la hoja para el diámetro. Se ingresa como valor Input de perdidas 11.534193 m y se espera un valor de 2 m para el diámetro. Como se observa a continuación:

**Figura 68**

*Resultado de diámetro por la herramienta.*

<b>Caudal (Q)</b>	<input type="text" value="34000"/> m <sup>3</sup> /h	<b>CALCULAR DIAMETRO</b>
<b>Longitud(L)</b>	<input type="text" value="5000"/> m	
<b>Perdida de Carga (hf)</b>	<input type="text" value="11.534193"/> m	
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<input type="text" value="0.0007963"/> Pa*s	<b>Diametro (D)</b> <input type="text" value="1.9998715"/> m
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<input type="text" value="995.80783"/> kg/m <sup>3</sup>	
<b>Rugosidad(<math>\epsilon</math>)</b>	<input type="text" value="0.00005"/> m	

**Nota.** resultado obtenido de caudal por medio de la herramienta programada.

Debido a lo anterior podemos asegurar que los resultados brindados por la herramienta de cálculo programada son válidos para caudal, pérdidas, diámetro y propiedades.

Por otra parte, con el fin de validar la sección de transferencia de calor y aislamiento se desarrolla el ejemplo de la siguiente figura:

### Figura 69

*Ejercicio de transferencia de calor.*



**Solution: 4.16kW**

**Nota.** diagrama del ejercicio de transferencia de calor.

Para la solución de este ejercicio mediante la herramienta, como no se tiene aislamiento y la temperatura entregada es la temperatura de la superficie, se ingresa  $20^{\circ}\text{C}$  como Temperatura Ambiente,  $80^{\circ}\text{C}$  como Temperatura Fluido, 0.2 m como diámetro y se coloca 0 m como espesor de tubería, para que la herramienta lo tome como temperatura en la pared externa de la tubería. Los materiales son independientes y no afectan el cálculo. A continuación, se evidencia el resultado de la herramienta:

## Figura 70

Resultados de calor.

Temperatura Fluido	<input type="text" value="80"/>	°C	Espesor Aislante	<input type="text" value="0"/>	m
Temperatura Ambiente	<input type="text" value="20"/>	°C	<input type="button" value="CALCULAR AISLANTE"/>		
Diametro	<input type="text" value="0.2"/>	m			
Tuberia	<input type="text" value="Acero al Carbon 0.5%C"/>				
Espesor Tuberia	<input type="text" value="0"/>	m			
Aislante	<input type="text" value="Lana de Vidrio"/>				
			Calor Perdido	<input type="text" value="0.207880377"/>	kW/m
			<input type="button" value="CALCULAR CALOR"/>		
			<input type="button" value="LIMPIAR"/>		

**Nota.** resultado de calor perdido para el ejercicio planteado.

Al multiplicar los 0.207880377 kW/m resultantes por los 20m de longitud de la tubería, se tiene como respuesta 4.1576 kW, siendo este valor igual a la solución del ejercicio. Por ende, se concluye que esta sección también funciona de manera adecuada.

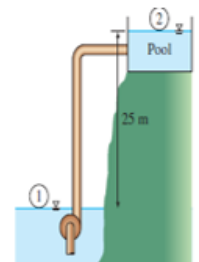
Para la sección de Potencia de Bombeo y Presión, se valida mediante el ejemplo mostrado en la siguiente figura [41].

## Figura 71

Ejercicio planteado para la potencia y presión de la bomba.

### EJEMPLO 5-15 Bombeo de agua desde un lago a una piscina

Una bomba sumergible con una potencia de 5 kW y una eficiencia del 72% es usada para bombear agua desde un lago hasta una piscina a través de una tubería de diámetro constante. La superficie libre de la piscina es de 25 m encima de la superficie libre del lago. Si la pérdida de carga es de 4 m, determine la tasa de descarga de agua y la diferencia de presión a través de la bomba.



12.7 L/s

**Nota.** enunciado del ejercicio planteado para la potencia y presión de la bomba. Tomado de: Y. Cengel and J. Cimbala, Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications. New York: McGraw-Hill, 2014.

Primero que todo se determina y carga la densidad, mediante la hoja de propiedades y posteriormente se ingresaron los datos a la herramienta. Luego, se

presiona para calcular el caudal, entregando el Output que se observa en la siguiente figura:

**Figura 72**

*Input "P Bomba".*

<b>Densidad</b>	<input type="text" value="999.7959013"/>	kg/m <sup>3</sup>	<input type="button" value="PROPIEDADES"/>	<input type="button" value="INICIO"/>
<b>Presión Entrada</b>	<input type="text" value="1"/>	bar		
<b>Presión Salida</b>	<input type="text" value="1"/>	bar	<input type="button" value="CALCULAR POTENCIA DE BOMBEO"/>	<input type="button" value="CALCULAR CAUDAL DE BOMBEO"/>
<b>Diametro Punto 1</b>	<input type="text" value="0.1"/>	m		
<b>Diametro Punto 2</b>	<input type="text" value="0.1"/>	m		
<b>Altura Punto 1</b>	<input type="text" value="0"/>	m	<input type="button" value="CALCULAR PRESIÓN DE ENTRADA"/>	<input type="button" value="CALCULAR PRESIÓN DE SALIDA"/>
<b>Altura Punto 2</b>	<input type="text" value="25"/>	m		
<b>Caudal</b>	<input type="text" value="45.56450371"/>	m <sup>3</sup> /h		
<b>Perdidas de Carga h<sub>L</sub></b>	<input type="text" value="4"/>	m		
<b>Potencia de Bombeo</b>	<input type="text" value="5000"/>	W	<b>Eficiencia</b>	<input type="text" value="72"/> %
				<input type="button" value="LIMPIAR"/>

**Nota.** Variables de entrada para los cálculos referentes a la bomba.

La respuesta de la herramienta es de 45.5645 m<sup>3</sup>/h, siendo 12.657 L/s. Un valor igual a los 12.7 L/s que entrega la solución del ejercicio[41]. Por ende, esta sección también es confiable.

Con el fin de obtener una mayor seguridad del funcionamiento de esta herramienta programada, también se realiza una comparación con ASPEN HYSYS v9 [42]. Para la cual se ingresa un caudal de 100 m<sup>3</sup>/h de agua a 25°C y 1 bar, que pasa a través de una tubería de 0.2 m de diámetro interno, se calcula la caída de presión o perdidas en este simulador y en la herramienta como se muestran en las figuras a continuación:

**Figura 73**

*Definición de la corriente en HYSYS.*

Material Stream: 1

Worksheet	Attachments	Dynamics
<b>Worksheet</b>	Stream Name	<b>1</b> Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0.0000 1.0000
Properties	Temperature [C]	<b>25.00</b> 25.00
Composition	Pressure [bar]	<b>1.000</b> 1.000
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	5540 5540
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	9.980e+004 9.980e+004
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	<b>100.0</b> 100.0
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2.862e+005 -2.862e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	53.70 53.70
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-1.586e+009 -1.586e+009
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	98.34 98.34
	Fluid Package	<i>Basis-1</i>
	Utility Type	

**Nota.** definición de las variables de la corriente en Aspen Hysys.

**Figura 74**

*Resultado de caída de presión en HYSYS.*

Pipe Sizing: Pipe Sizing-1

Design	Performance								
<b>Design</b>	Name <b>Pipe Sizing-1</b>								
Connections	Stream <b>1</b> <input type="button" value="Select Stream..."/>								
Notes									
	Sizing Input								
	<table border="1"><tbody><tr><td>Calculation Type</td><td><b>Pressure Drop</b></td></tr><tr><td>Schedule</td><td></td></tr><tr><td>Pipe Inside Diameter [mm]</td><td><b>200.0</b></td></tr><tr><td>Pressure Drop [kPa/m]</td><td>3.352e-002</td></tr></tbody></table>	Calculation Type	<b>Pressure Drop</b>	Schedule		Pipe Inside Diameter [mm]	<b>200.0</b>	Pressure Drop [kPa/m]	3.352e-002
Calculation Type	<b>Pressure Drop</b>								
Schedule									
Pipe Inside Diameter [mm]	<b>200.0</b>								
Pressure Drop [kPa/m]	3.352e-002								

**Nota.** respuesta de la caída de presión en kPa/m para el ejercicio planteado.

**Figura 75**

*Input pérdidas.*

	Densidad( $\rho$ )	<input type="text" value="997.2064727"/>	kg/m <sup>3</sup>		PROPIEDADES	INICIO
	Viscosidad( $\mu$ )	<input type="text" value="8.88E-04"/>	Pa*s			
	Caudal (Q)	<input type="text" value="100"/>	m <sup>3</sup> /h			
					<b>CALCULAR PERDIDAS</b>	
Tuberia	Longitud(L)	<input type="text" value="1"/>	m			
	Diametro (D)	<input type="text" value="0.2"/>	m			
	Rugosidad( $\epsilon$ )	<input type="text" value="4.72E-05"/>	m			
Accesorios	Accesorios	<input type="text"/>		ADICIONAR ACCESORIOS	QUITAR ACCESORIOS	Perdida de Carga (hf) <input type="text" value="0.0034555"/> m
	Cantidad actual	<input type="text"/>				<b>LIMPIAR</b>
Cambios de Diametro	Tipo	<input type="text"/>			AGREGAR	BORRAR
	Angulo	<input type="text"/>	°			
	Diametro Menor	<input type="text"/>	m			
	Diametro Mayor	<input type="text"/>	m			

**Nota.** variables de entrada para los cálculos referentes a las pérdidas.

Como se puede observar, el resultado del simulador Aspen Hysys es de 0.03352 kPa por cada metro. A su vez, el resultado de la herramienta programada después de convertirlo de metros de agua a kPa es de 0.03375 kPa para el metro de longitud que se especificó. Por ende, se valida que los resultados de la herramienta contra los del simulador son confiables.

### 5.3 Descarga de la Herramienta

La herramienta de cálculo programada en VBA, descrita en este capítulo y con la cual se procede a realizar los cálculos para el diseño de redes, se puede encontrar y descargar mediante el siguiente enlace permanente:

Enlace de Descarga para Google Drive:

[https://drive.google.com/file/d/1hD\\_d-8XrIY\\_gpQW4ZkHD6vjM5kgazgCz/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1hD_d-8XrIY_gpQW4ZkHD6vjM5kgazgCz/view?usp=sharing)

También puede acceder mediante el siguiente código QR:

**Figura 76**

*Código QR*



**Nota.** código QR para descargar la herramienta de cálculo programada.

## 6. PROPUESTA DE DISTRIBUCIÓN DE REDES

### 6.1 Distribución de los Equipos

Inicialmente la planta piloto será ubicada en uno de los edificios del campus de los cerros de la Universidad América, se contempló el uso de los salones M16, M15, M14 y el comedor de profesores para la ubicación de los equipos y el salón M13 para almacenamiento de reactivos; esto es una propuesta tentativa para la distribución de los equipos en el espacio, por lo que pueden existir modificaciones en el futuro.

Para una correcta distribución de las unidades de proceso, lo primero que se realiza es la medición de los salones, a fin de elegir el mejor espacio para cada uno de ellos y las modificaciones estructurales que se deben realizar, ya que se hará en un edificio construido. Es de tener en cuenta que el salón M15 tiene doble altura y se encuentra ubicado en el primer piso junto con el salón M16 y los separa una pared, el salón M14 se encuentra ubicado sobre el salón M16, y el comedor está en el segundo piso diagonal al M14.

En la siguiente figura se muestran las dimensiones de los salones.

**Tabla 10**

*Dimensiones de los salones M16, M15, M14 y comedor.*

<b>Dimensiones Salones</b>			
<b>Salon</b>	<b>Ancho(m)</b>	<b>Largo(m)</b>	<b>Altura(m)</b>
<b>M16</b>	4.7	6.4	2.7
<b>M15</b>	4.8	6.4	5.3
<b>M14</b>	4.9	6.5	2.3
<b>Comedor</b>	5	5.1	2.6
<b>M13</b>	4.7	5.1	2.6

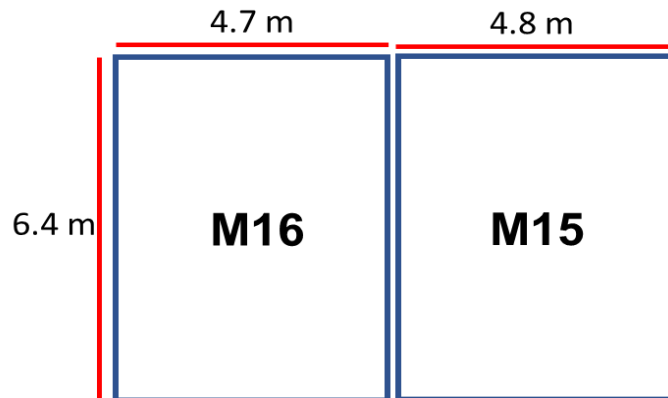
**Nota.** Dimensiones de los salones estudiados, tomadas directamente del edificio de la Universidad América.



A continuación, se presentan las dimensiones de los salones de acuerdo con el nivel en el que se encuentren.

**Figura 77**

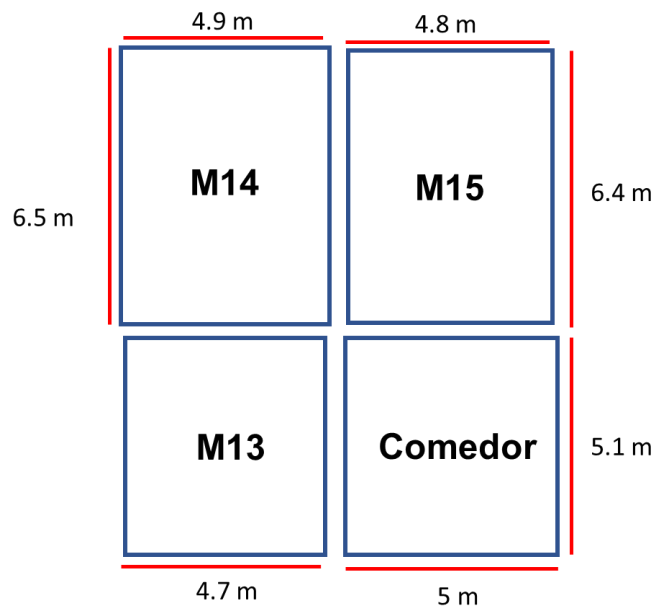
*Dimensiones de los salones primer nivel.*



**Nota.** Vista en planta de los salones. Dimensiones de ancho y largo de los salones donde se ubicarán las unidades de proceso.

**Figura 78**

*Dimensiones de los salones segundo nivel.*



**Nota.** Vista en planta de los salones. Dimensiones de ancho y largo de los salones donde se ubicarán las unidades de proceso.

Conociendo las dimensiones de los salones y los equipos, se tomaron las decisiones arquitectónicas de modificar la altura de los salones y reforzar la estructura del edificio para ubicar los equipos, además de conectar los salones a fin de que haya comunicación de la tubería y los procesos. Las nuevas dimensiones se encuentran en la siguiente tabla:

**Tabla 11**

*Dimensiones modificadas de los salones M16, M15, M14, M13 y comedor.*

<b>Dimensiones Salones</b>				
<b>Salón</b>	<b>Ancho(m)</b>	<b>Largo(m)</b>	<b>Altura(m)</b>	<b>Subir el Techo (m)</b>
<b>M16</b>	4.7	6.4	2.7→3.5	0.8
<b>M15</b>	4.8	6.4	5.3→7.3	2
<b>M14</b>	4.9	6.5	2.3→3.5	1.2
<b>Comedor</b>	5	5.1	2.6→3.5	0.9
<b>M13</b>	4.7	5.1	2.6→3.5	0.9

**Nota.** Dimensiones de los salones aumentando la altura.

Por otra parte, se realiza una ampliación al primer nivel de la planta piloto al lado del salón M16 con el fin de ubicar la planta térmica y la planta de tratamiento de aguas (PTAR y PTAI). Sus dimensiones se encuentran plasmadas en la figura 79.

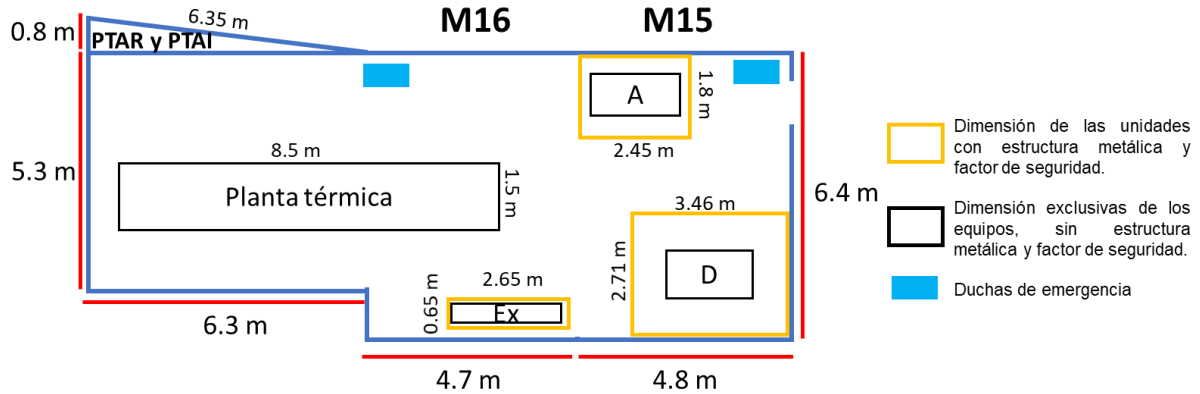
Al haber tomado las decisiones respecto a las dimensiones necesarias en los salones y la ampliación, se procede a proponer la distribución para los equipos teniendo en cuenta sus dimensiones (Tabla 2) y la relación que tienen con el proceso.

La planta de absorción y la de destilación son las que mayor altura requieren debido a su diseño estructural. Por tal motivo, serán ubicadas en el salón M15. En el salón M16 se ubicarán la planta térmica y la planta de extracción. Por otra parte, el banco de reactores y el tren evaporación se ubicarán en el M14 y, por último, el secador se ubicará en el comedor. La planta térmica se situará en la ampliación y el salón M16.

La distribución final de las unidades de proceso se muestra en la siguiente figura, esta es una vista de planta.

**Figura 79**

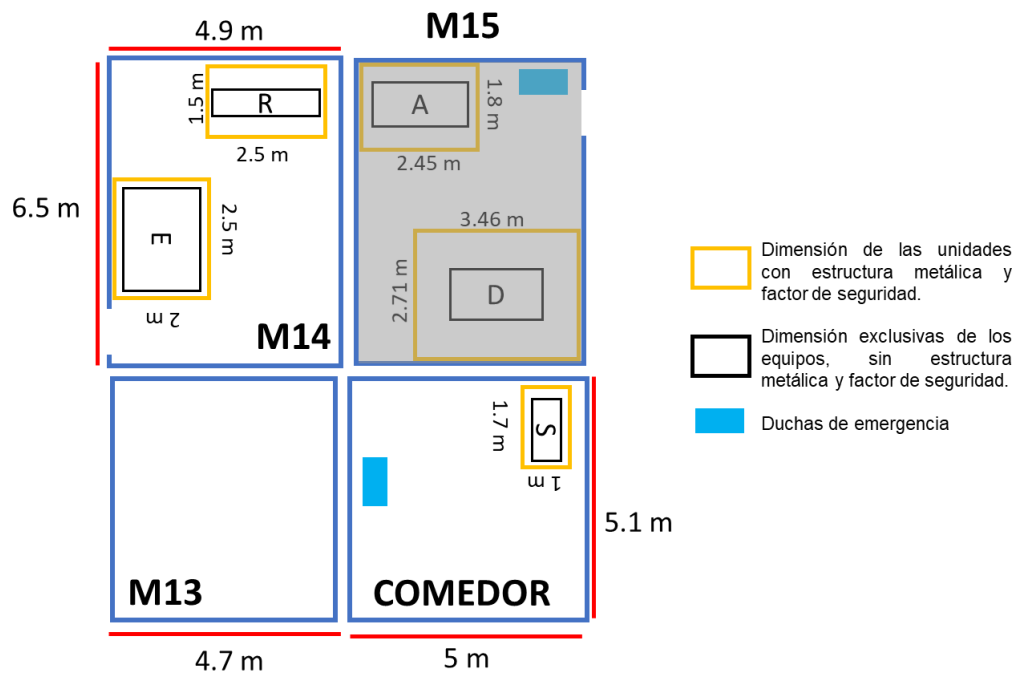
*Distribución de unidades de proceso en el primer nivel de la planta, salones M16 y M15.*



**Nota.** Vista en planta de la distribución de las unidades de proceso en los salones y dimensiones de los equipos.

**Figura 80**

*Distribución de unidades de proceso en el segundo nivel de la planta, salones M14 y comedor.*



**Nota.** Vista en planta de la distribución de las unidades de proceso en los salones y dimensiones de los equipos.

Donde:

D: Columna de destilación.

A: Torre de absorción.

E: Tren de evaporadores.

R: Banco de reactores.

Ex: Planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.

S: Secador de bandejas.

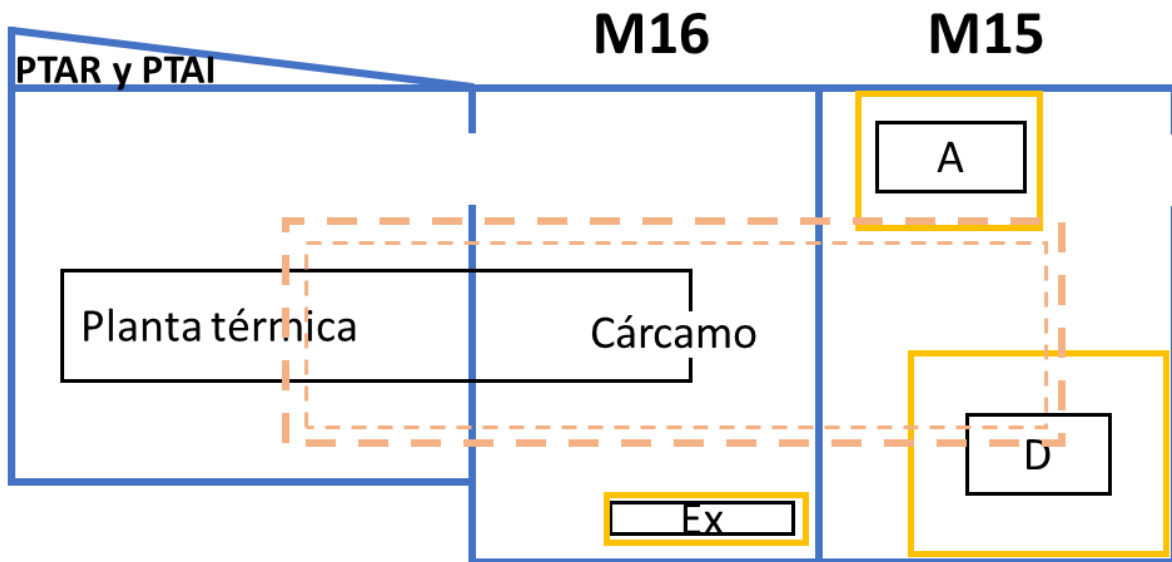
De acuerdo con este diseño se realiza la propuesta para la distribución de redes de la planta piloto.

## 6.2 Diseño de cárcamo

De acuerdo con los requerimientos de aguas residuales de las unidades de proceso descritas con anterioridad y los elementos adicionales que son parte de la planta piloto, se realizó el diseño del cárcamo que permite la recolección del volumen total del agua residual que será tratada en las plantas.

El cárcamo está ubicado en el primer nivel de la planta piloto, corresponde a los salones M15, M16 y la extensión justo en el medio de los equipos como se ve en la figura 81. Se diseñó un cárcamo rectangular cuyas dimensiones son de 10.5m de largo y 3m de ancho. Por otra parte, la profundidad de las esquinas es diferente con el fin de lograr una pendiente que favorezca el flujo del fluido hacía la planta de tratamiento de aguas (PTAR y PTAI); las profundidades serán: para la esquina superior derecha 30cm, esquina inferior derecha 25cm, esquina inferior izquierda 30cm y esquina superior izquierda 40cm. Por último, el ancho de la rejilla será de 25cm. El volumen total de almacenamiento será de 2.04m<sup>3</sup>, capacidad suficiente para soportar la situación crítica donde los equipos descarguen todos al mismo tiempo, la descarga continua de las duchas y el agua residual de la planta térmica.

**Figura 81**  
*Cárcamo.*



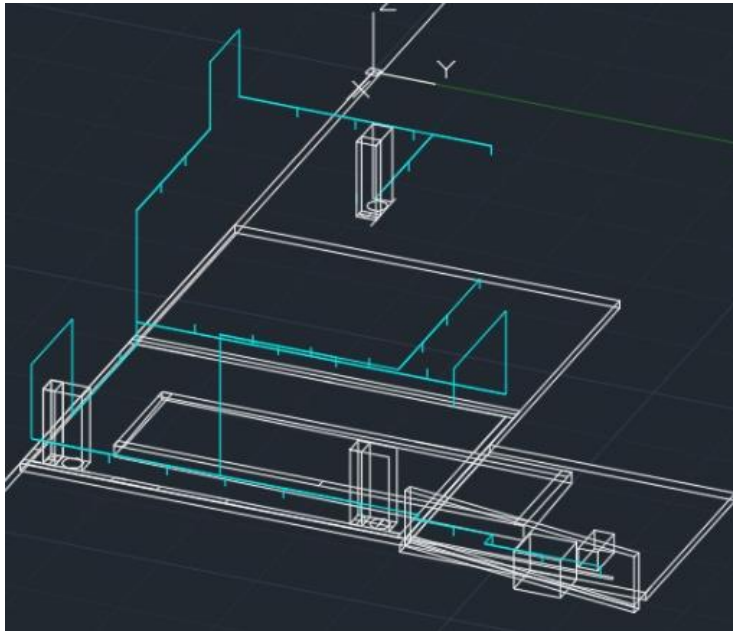
**Nota.** Vista en planta de la ubicación del cárcamo en el primer nivel de la planta piloto.

### 6.3 Diseño de la red de agua de proceso

El diseño de la red de agua de proceso se realiza teniendo en cuenta el área donde se ubicará la planta piloto. La red inicia desde el punto de bombeo, ubicado en la zona de tratamiento de agua (PTAR y PTAI) y recorre el perímetro de la construcción pasando por los salones M16, M15, M14, comedor y M13, en la figura 110 del Anexo 1 se ilustra la vista en planta de la red. En la siguiente figura se observa la red:

## Figura 82

*Red de agua de proceso.*



**Nota.** Vista de la red de agua de la planta piloto.

Para el diseño de la red se considera un punto de conexión cada 1.5m, con el fin de dar flexibilidad a la distribución de los equipos dentro de la planta piloto una vez se determine su ubicación final, o si se adquieren nuevos equipos.

Con el diseño establecido, se procede a determinar la longitud total de la tubería requerida, obteniendo un valor de 95.2m. En cuanto a accesorios, se necesitan 50 codos de 90° y 30 conexiones en “T”.

Para el cálculo del diámetro se utiliza la ecuación 14 donde se relaciona el caudal, la velocidad del fluido y el diámetro de la tubería. De acuerdo con los requerimientos establecidos, el caudal necesario en la planta piloto es de 9.58 m<sup>3</sup>/h, teniendo en cuenta el requerimiento de la planta térmica de ingeniería mecánica. Adicionalmente, se estableció la velocidad del fluido de acuerdo con la heurística que establece un rango de velocidad para el agua de 1.5m/s a 3m/s, donde el valor óptimo será de 2.5m/s. [14] Con estos valores se calcula el diámetro de la tubería obteniendo un valor de 0.036814m. Este valor se ingresa a la herramienta de cálculo programada en la sección “Selección de tubería”, cuyo output indicará la tubería comercial estándar que mejor se ajusta, el resultado se muestra en la siguiente figura:

**Figura 83**

*Selección de tubería para la red de agua de proceso.*

<b>Diametro Nominal</b>	<b>40</b> mm <b>1 1/2</b> in
<b>Diametro Interno(DI)</b>	<b>38.14</b> mm
<b>Diametro Externo(DE)</b>	<b>48.3</b> mm
<b>Calibre</b>	<b>XS 80 80S</b>
<b>Peso</b>	<b>5.41</b> kg/m
<b>Espesor</b>	<b>5.08</b> mm

**Nota.** Resultado de la sección “selección de tubería” para agua de proceso.

Según los resultados obtenidos por la herramienta, se recomienda tubería en PVC con un diámetro nominal de 40mm, calibre XS 80 80S cuyo espesor será de 5.08mm.

Es necesario cargar las propiedades del fluido a fin de establecer las pérdidas de carga en tubería y accesorios. Para esto se utiliza la sección “Propiedades fluidos” donde se establece la temperatura de fluido a 25°C y presión a 3Bar obteniendo los siguientes resultados:

**Figura 84**

*Propiedades del fluido.*

<b>Manual</b>			<b>INICIO</b>
<b>Temperatura (T)</b>	<b>25</b> °C		
<b>Presión (P)</b>	<b>3</b> Bar	<b>CALCULAR DIAMETRO</b>	<b>CALCULAR CAUDAL</b>
<b>Servicio</b>	<b>Agua de Proceso</b>		
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<b>0.000888251</b> Pa*s	<b>CALCULAR PERDIDAS</b>	<b>PRESIÓN POTENCIA BOMBA</b>
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<b>997.206472656</b> kg/m <sup>3</sup>		
	<b>CARGAR PROPIEDADES</b>	<b>LIMPIAR</b>	

**Nota.** Resultado de la sección “propiedades fluidos” para agua de proceso.

Una vez cargadas las propiedades de los fluidos, conociendo el diámetro interno de la tubería, los accesorios requeridos y la longitud de esta; se procede a calcular las pérdidas por tubería y accesorios con la herramienta de cálculo elaborada en la sección “Cálculo de pérdidas” cuyo resultado fue de 29.19m como se ilustra a continuación:

**Figura 85**

*Pérdidas de carga.*

Manual	Densidad( $\rho$ )	997.2064727	kg/m <sup>3</sup>
	Viscosidad( $\mu$ )	8.85E-04	Pa*s
	Caudal (Q)	9.58	m <sup>3</sup> /h
Tubería	Longitud(L)	95.2	m
	Diametro (D)	0.03514	m
Tabla	Rugosidad( $\epsilon$ )	1.50E-06	m
Accesorios	Accesorios	Conexión estándar T flujo directo	
	Cantidad actual	30	
Cambios de Diametro	Tipo		
	Angulo		°
	Diametro Menor		m
	Diametro Mayor		m

PROPIEDADES INICIO  
 CALCULAR PERDIDAS  
 Pérdida de Carga (hf) 20.155244 m  
 LIMPIAR  
 AGREGAR BORRAR

**Nota.** Resultado de la sección “calcula de pérdidas” para la tubería y accesorios de la red de agua de proceso.

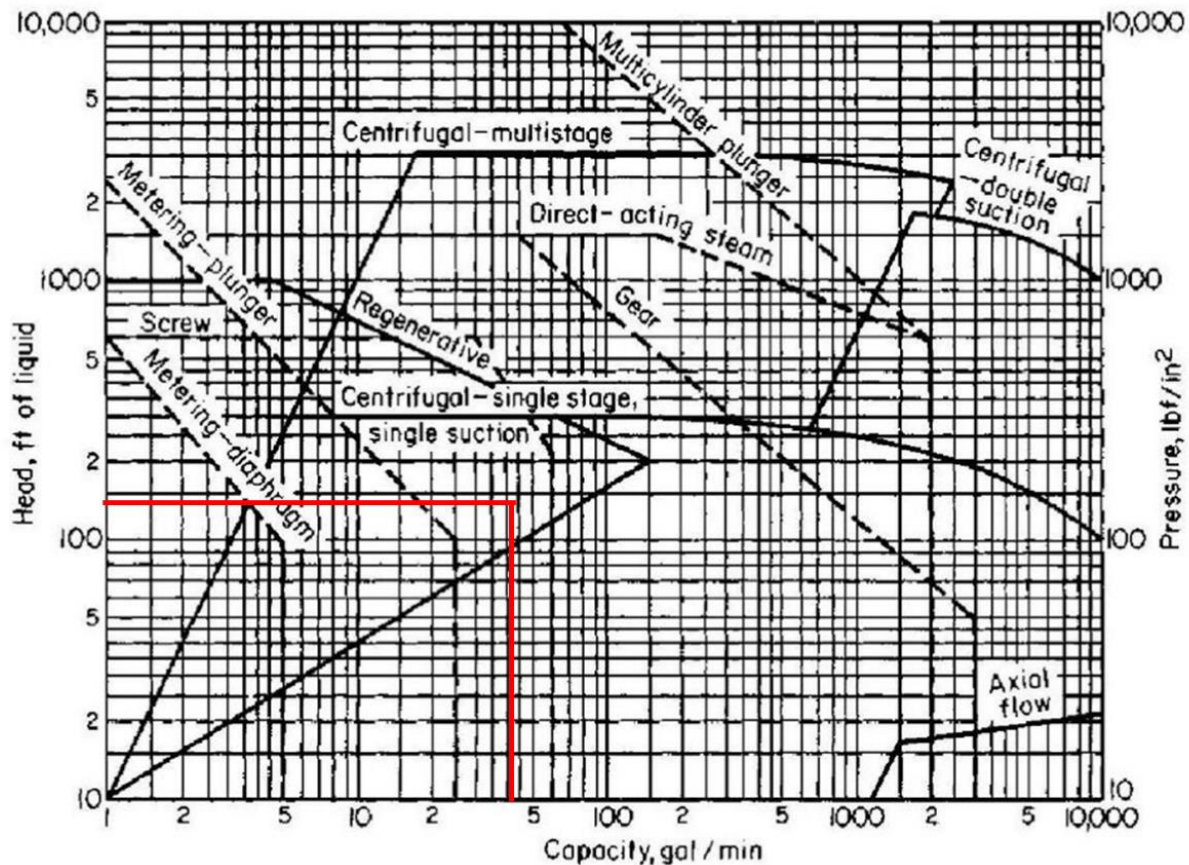
Adicionalmente a las pérdidas ocasionadas por la fricción entre el fluido y la superficie de la tubería, se agrega la pérdida de presión debido a los tramos verticales dentro de la red, esto se traduce como la cabeza de agua directa que corresponde a un total de 14.8m. Al sumar las pérdidas se tiene un total para cabeza de presión de 44m.

Con el dato de cabeza de presión y el de caudal del fluido, se selecciona la bomba que cumple con las necesidades del proceso utilizando las gráficas de “Criterios de selección de bombas” mostradas a continuación:



**Figura 86**

*Criterios de selección de bombas.*



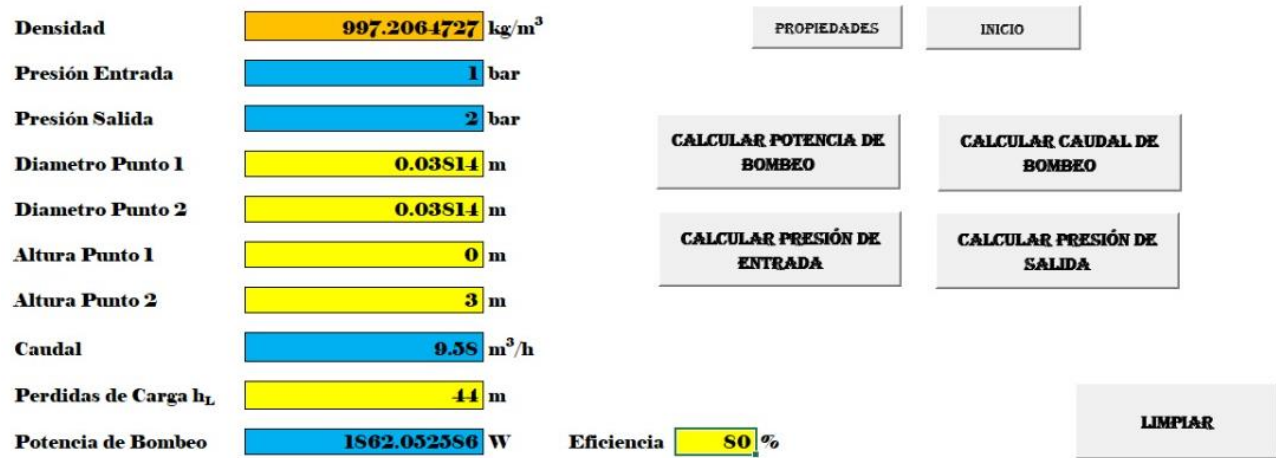
**Nota.** Grafica para la selección de bomba de acuerdo con los criterios de caudal y cabeza. Tomado de: R. Perry, Perry's Chemical Engineers Handbook, 7a ed., McGraw-Hill, 1997.

A causa de su amplia aplicación en la industria y cumpliendo con los requerimientos para el servicio de agua de proceso de la planta piloto, se recomienda el uso de una bomba centrífuga de una etapa.

Por último, con el uso de la herramienta de cálculo se establece la potencia requerida para la bomba seleccionada, en la sección "Presión potencia de bomba". Teniendo en cuenta que la succión de la bomba será de 1bar y la descarga al final de la línea de 2bar, con una eficiencia del 100%, la potencia requerida será de 1.5kW. Sin embargo, dado que comercialmente se manejan eficiencias cercanas al 80%, la potencia requerida será de 1.9kW. En la siguiente figura se muestra la sección desarrollada:

**Figura 87**

*Potencia de bombeo.*



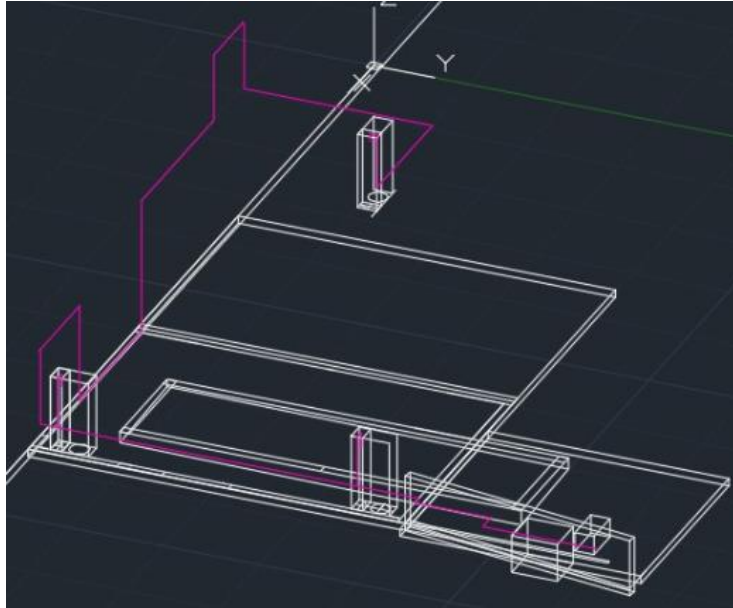
**Nota.** Resultado de la sección “presión potencia de bombeo” para la bomba.

#### 6.4 Diseño de la red de agua para las duchas de seguridad

El diseño de la red de agua para las duchas de seguridad se realiza teniendo en cuenta el área donde se ubicará la planta piloto. La red inicia desde el punto de bombeo ubicado en la zona de tratamiento de agua (PTAR y PTAI) y recorre el perímetro de la construcción pasando por los salones M16, M15 y comedor donde se ubicarán las duchas de emergencia; en la figura 112 del Anexo 1 se ilustra la vista en planta de la red. En la siguiente figura se observa la red:

## Figura 88

*Red de agua para duchas de emergencia.*



**Nota.** Vista de la red de agua para las duchas de emergencia de la planta piloto.

Para el diseño de la red se considera la ubicación de las duchas dentro del área determinada para la planta piloto. Con el diseño establecido, se procede a determinar la longitud total de la tubería requerida, obteniendo un valor de 61m, además en cuanto a accesorios se necesitan 23 codos de 90° y 2 conexiones en “T”.

Para el cálculo del diámetro se utilizará nuevamente la ecuación 14. De acuerdo con la norma ANSI / ISEA Z358.1-2014, el caudal recomendado es de 76 l/min que equivale a 17.784m<sup>3</sup>/h para las tres duchas con un factor de seguridad del 30%, teniendo en cuenta el caso crítico donde las 3 duchas estén funcionando al tiempo.[31] Se asumió la misma heurística del agua de proceso para la velocidad del fluido de las duchas, donde el valor óptimo será de 2.5m/s. [14] Con estos valores se calcula el diámetro de la tubería obteniendo un valor de 0.05m, este valor se ingresa a la herramienta de cálculo programada en la sección “Selección de tubería” cuyo output indicará la tubería comercial estándar que mejor se ajusta, el resultado se muestra en la siguiente figura:

## Figura 89

*Selección de tubería para la red de agua de duchas de emergencia.*

<b>Diametro Nominal</b>	<b>60</b> mm
	<b>2 1/2</b> in
<b>Diametro Interno(DI)</b>	<b>54.58</b> mm
<b>Diametro Externo(DE)</b>	<b>60.3</b> mm
<b>Calibre</b>	<b>21</b>
<b>Peso</b>	<b>0.811</b> kg/m
<b>Espesor</b>	<b>2.87</b> mm

**Nota.** Resultado de la sección “selección de tubería” para agua de las duchas de emergencia.

Se recomienda el uso de tubería PVC con diámetro nominal de 60mm con un espesor de 2.87mm para la tubería de las duchas de emergencia.

Se utilizan las mismas propiedades establecidas para el servicio de agua de proceso.

Una vez cargadas las propiedades de los fluidos, conociendo el diámetro interno de la tubería, los accesorios requeridos y la longitud de esta; se procede a calcular las pérdidas por tubería y accesorios con la herramienta de cálculo elaborada en la sección “Cálculo de pérdidas” cuyo resultado fue de 7.54m como se ilustra a continuación:

**Figura 90**

*Perdidas de carga.*

Densidad( $\rho$ )	997.2064727	kg/m <sup>3</sup>	PROPIEDADES	INICIO
Viscosidad( $\mu$ )	8.85E-04	Pa*s	CALCULAR PERDIDAS	
Caudal (Q)	17.784	m <sup>3</sup> /h		
Longitud(L)	61	m	Perdida de Carga (hf) 7.54697601 m	
Diametro (D)	0.05458	m		
Rugosidad( $\epsilon$ )	1.50E-06	m		
Accesorios	Codo Estándar 90°		ADICIONAR ACCESORIOS	QUITAR ACCESORIOS
Cantidad actual	23		LIMPIAR	
Tipo			AGREGAR BORRAR	
Angulo		°		
Diametro Menor		m		
Diametro Mayor		m		

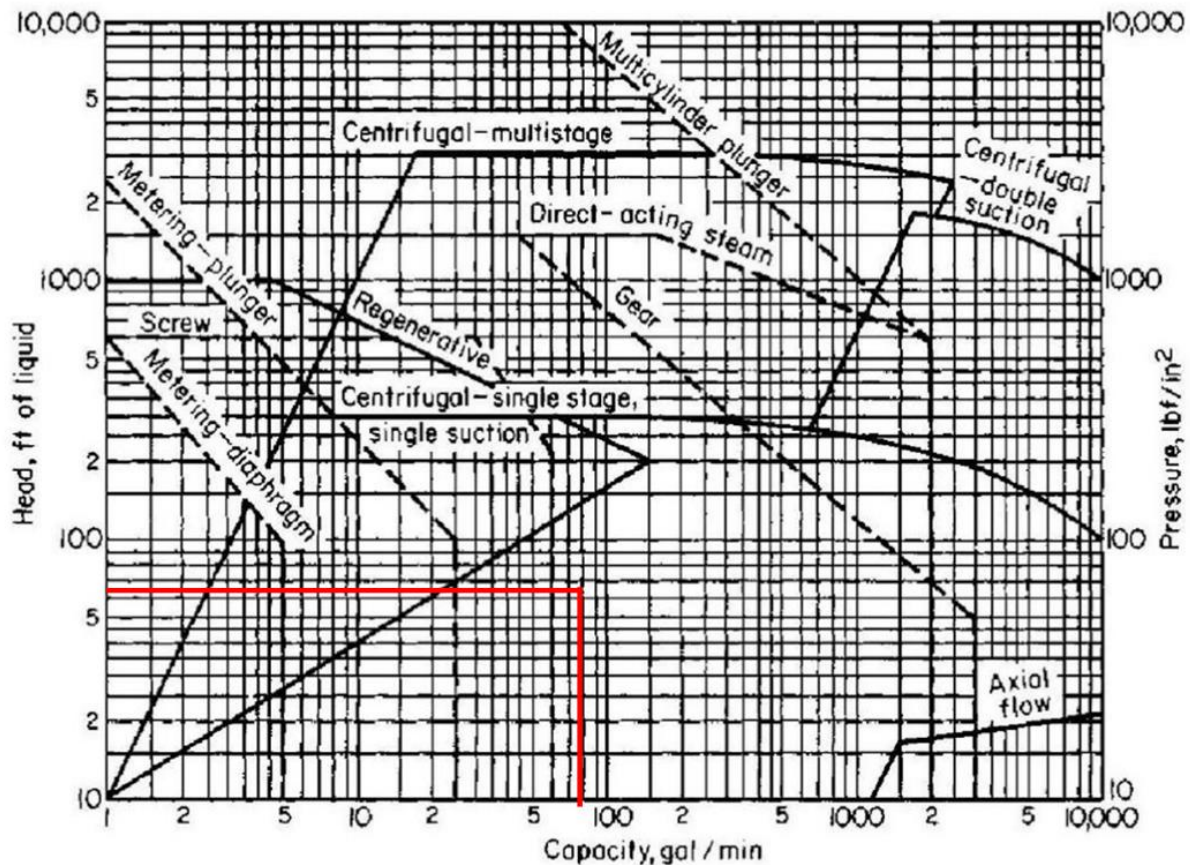
**Nota.** Resultado de la sección “cálculo de pérdidas” para la tubería y accesorios de la red de agua para duchas de emergencia.

Además de las pérdidas, debido a la fricción ocasionada entre el fluido y la superficie de la tubería, se adiciona la pérdida de presión por los tramos verticales dentro de la red, que se traduce como la cabeza de agua directa; correspondiente a un total de 12.76m. Obteniendo un total para la cabeza de presión de 20.3m.

Con el dato de cabeza de presión y el caudal del fluido, se selecciona la bomba que cumpla con las necesidades del proceso utilizando las gráficas de “Criterios de selección de bombas” mostradas a continuación:

**Figura 91**

*Criterios de selección de bombas.*



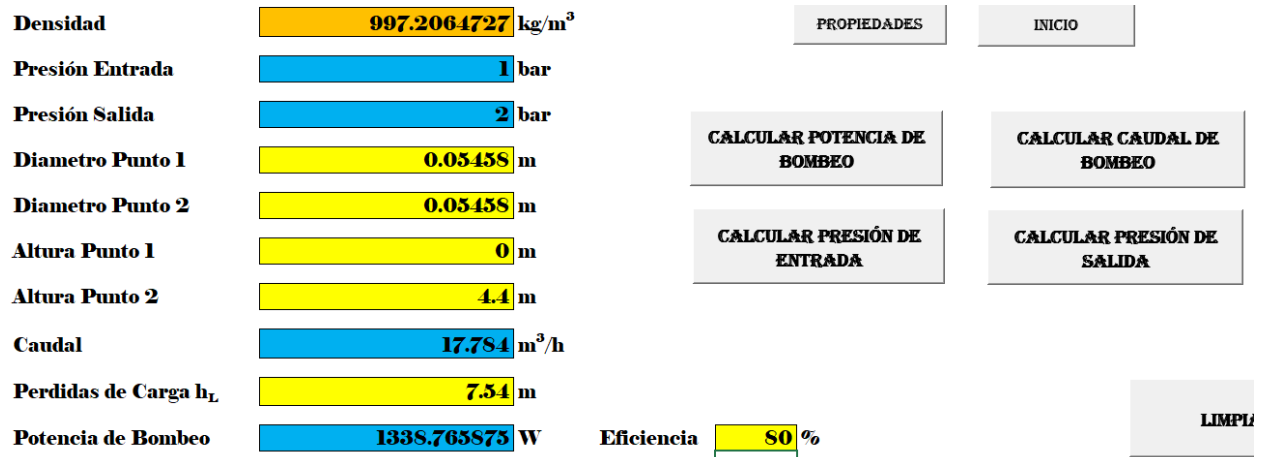
**Nota.** Gráfica para la selección de bomba de acuerdo con los criterios de caudal y cabeza. Tomado de: R. Perry, Perry's Chemical Engineers Handbook, 7a ed., McGraw-Hill, 1997.

Como en el caso anterior, se recomienda una bomba centrífuga de una etapa para el flujo del fluido hacia las duchas de emergencia.

Por último, con el uso de la herramienta de cálculo, se establece la potencia requerida para la bomba seleccionada, en la sección "Presión potencia de bomba". Teniendo en cuenta que la succión de la bomba será de 1bar y la descarga al final de la línea de 2bar, con una eficiencia del 80% la potencia requerida será de 1.34kW. En la siguiente figura se muestra la sección desarrollada:

**Figura 92**

*Potencia de bombeo.*



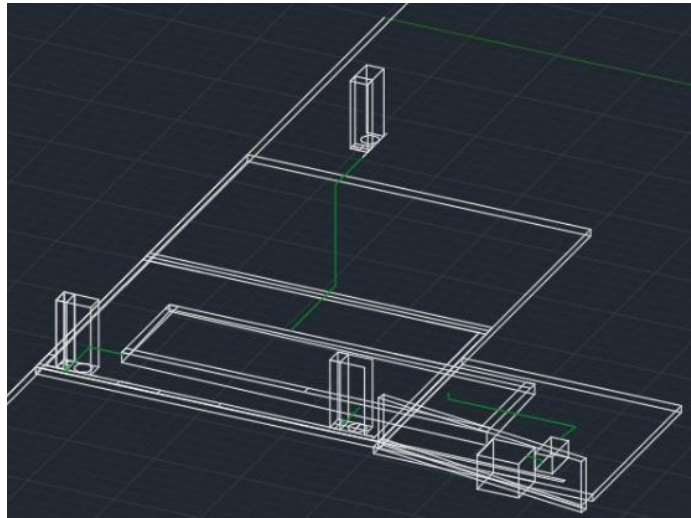
**Nota.** Resultado de la sección “presión potencia de bombeo” para la bomba.

## 6.5 Diseño de la red de agua residual

La red de agua residual considera el cárcamo que se mencionó anteriormente; un tanque acumulador cuyas dimensiones son de 1m\*1m\*1.2m, que cumple la función de acumular los fluidos antes de dirigirse hacia la planta de tratamiento de agua; un tanque de acondicionamiento para la planta térmica cuyas dimensiones son 0.5m\*0.5m\*1m; y, por último, el drenaje de las duchas de seguridad. En la figura 113 del Anexo 1 se ilustra la vista en planta de la red. En la siguiente figura se observa la red:

**Figura 93**

*Red de agua residual para planta piloto.*



**Nota.** Vista de la red de agua residual en la planta piloto.

Con el diseño establecido, se procede a determinar la longitud total de la tubería requerida, obteniendo un valor de 18.9m, además se necesitan 7 codos de 90°.

Considerando que el fluido residual es agua, se calculan las propiedades obteniendo los siguientes resultados:

**Figura 94**

*Propiedades de los fluidos para la red de agua residual.*

<b>Temperatura (T)</b>	<b>25 °C</b>
<b>Presión (P)</b>	<b>1 Bar</b>
<b>Servicio</b>	<b>Agua Residual</b>
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<b>0.000888251 Pa*s</b>
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<b>997.206472656 kg/m<sup>3</sup></b>

**Nota.** Resultado de la sección “selección de tubería” para agua de las duchas de emergencia.



Se tiene en cuenta que desde el cárcamo hacia el tanque acumulador se conectan a través de un sifón, ya que se encuentran adyacente el uno del otro.

Para el cálculo del diámetro de la tubería en la descarga de las duchas se utiliza la ecuación 14, considerando un caudal de 17.784m<sup>3</sup>/h y una velocidad de 1.5m/s. [14] El diámetro de la tubería es de 0.065m, este valor se ingresa a la herramienta de cálculo programada en la sección “Selección de tubería”, cuyo output indicará la tubería comercial estándar que mejor se ajusta. El resultado se muestra en la siguiente figura:

**Figura 95**

*Selección de tubería para la red de agua residual.*

<b>Diametro Nominal</b>	<b>73</b> mm
	<b>3</b> in
<b>Diametro Interno(DI)</b>	<b>66.07</b> mm
<b>Diametro Externo(DE)</b>	<b>73</b> mm
<b>Calibre</b>	<b>21</b>
<b>Peso</b>	<b>1.185</b> kg/m
<b>Espesor</b>	<b>3.48</b> mm

**Nota.** Resultado de la sección “selección de tubería” para agua residual de la planta piloto.

De acuerdo con esto, se recomienda el uso de tubería PVC con diámetro nominal de 73mm y un espesor de 3.48mm.

Una vez cargadas las propiedades de los fluidos, conociendo el diámetro interno de la tubería, los accesorios requeridos y la longitud de esta; se procede a calcular las

pérdidas por tubería y accesorios con la herramienta de cálculo elaborada en la sección “Cálculo de pérdidas” cuyo resultado fue de 0.93m como se ilustra a continuación:

**Figura 96**

*Pérdidas de carga.*

Densidad( $\rho$ )	997.2064727 kg/m <sup>3</sup>	PROPIEDADES	INICIO
Viscosidad( $\mu$ )	8.88E-04 Pa*s	CALCULAR PERDIDAS	
Caudal (Q)	17.784 m <sup>3</sup> /h		
Longitud(L)	18.9 m	Perdida de Carga (hf) 0.93800782 m	
Diametro (D)	0.06607 m		
Rugosidad( $\epsilon$ )	1.50E-06 m		
Accesorios	Codo Estándar 90°	ADICIONAR ACCESORIOS	QUITAR ACCESORIOS
Cantidad actual	7	LIMPIAR	
Tipo		AGREGAR BORRAR	
Angulo	°		
Diametro Menor	m		
Diametro Mayor	m		

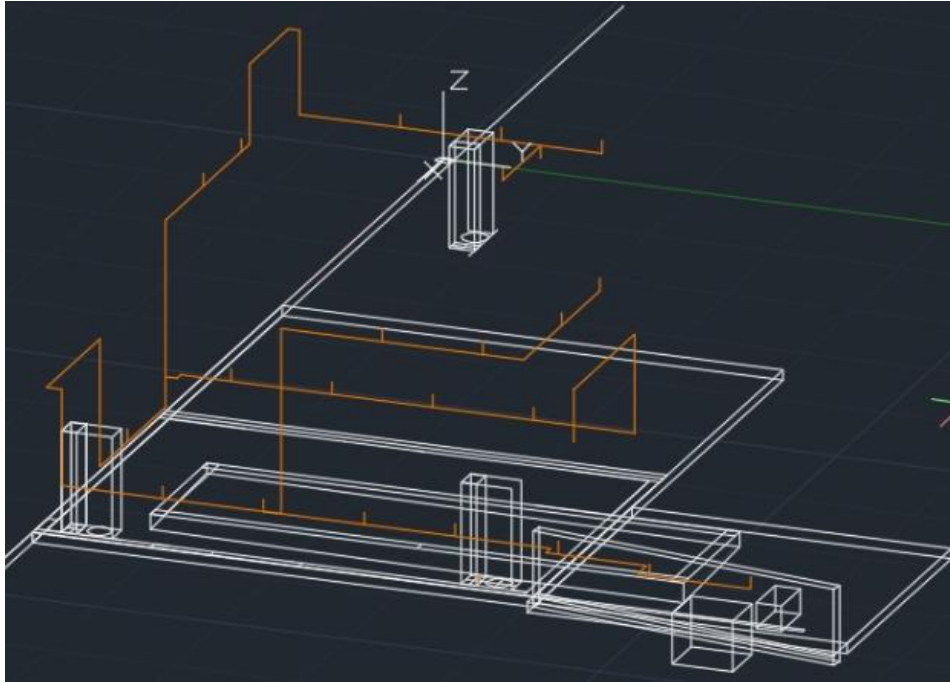
**Nota.** Resultado de la sección “Cálculo de pérdidas” para la tubería y accesorios de la red de agua para duchas de emergencia.

## 6.6 Diseño de vapor

El diseño de la red de vapor se realiza teniendo en cuenta el área donde se ubicarán las unidades de proceso de la planta piloto. La red inicia desde la planta térmica ubicada en la expansión y el M16 y recorre el perímetro de la construcción pasando por los salones M16, M15, M14, comedor y M13; en la figura 111 del Anexo 1 se ilustra la vista en planta de la red. En la siguiente figura se observa la red:

## Figura 97

*Red de vapor.*



**Nota.** Vista de la red de vapor de la planta piloto.

Para el diseño de la red se considera un punto de conexión cada 2m, con el fin de dar flexibilidad a la distribución de los equipos dentro de la planta piloto una vez se determine su ubicación final, o si se adquieren nuevos equipos.

Con el diseño establecido, se procede a determinar la longitud total de la tubería requerida, obteniendo un valor de 91.2m. Así mismo, en cuanto a accesorios se necesita de 46 codos de 90° y 21 conexiones en “T”.

Para el cálculo del diámetro se utiliza la ecuación 14. De acuerdo con los requerimientos establecidos, el caudal necesario en la planta piloto es de 80.6 kg/h que corresponde a  $48.43\text{m}^3/\text{h}$ . Adicionalmente se estableció la velocidad del fluido de acuerdo con la heurística, que comprende un rango de velocidad para el vapor de 20.4m/s a 30.5m/s, donde el valor óptimo será de 25m/s. [14] Con estos valores se calcula el diámetro de la tubería obteniendo un valor de 0.0262m. Este valor se ingresa a la herramienta de cálculo programada en la sección “Selección de tubería” cuyo output indicará la tubería comercial estándar que mejor se ajusta. El resultado se muestra en la siguiente figura:

**Figura 98**

*Selección de tubería para la red de vapor.*

<b>Diametro Nominal</b>	<b>25</b> mm <b>1</b> in
<b>Diametro Interno(DI)</b>	<b>26.64</b> mm
<b>Diametro Externo(DE)</b>	<b>33.4</b> mm
<b>Calibre</b>	<b>STD 40 40S</b>
<b>Peso</b>	<b>2.5</b> kg/m
<b>Espesor</b>	<b>3.38</b> mm

**Nota.** Resultado de la sección “selección de tubería” para el vapor.

Se recomienda el uso de tubería en acero al carbón STD 40 40S para el vapor con un diámetro nominal de 25mm y un espesor de 3.38.

Es necesario cargar las propiedades del fluido a fin de establecer las pérdidas de carga en tubería y accesorios. Para esto se utiliza la sección “Propiedades fluidos”, donde se tiene en cuenta que el fluido es vapor de agua por lo que la temperatura de fluido será de 130°C y presión 3bar obteniendo los siguientes resultados:

**Figura 99**

*Propiedades del fluido.*

<b>Temperatura (T)</b>	<b>130</b> °C
<b>Presión (P)</b>	<b>3</b> Bar
<b>Servicio</b>	<b>Vapor</b>
<b>Viscosidad(<math>\mu</math>)</b>	<b>0.000013365</b> Pa*s
<b>Densidad(<math>\rho</math>)</b>	<b>1.664311255</b> kg/m <sup>3</sup>

**Nota.** Resultado de la sección “propiedades fluidos” para vapor.

Una vez cargadas las propiedades de los fluidos, y conociendo el diámetro interno de la tubería, los accesorios requeridos y la longitud de esta; se procede a calcular las pérdidas por tubería y accesorios con la herramienta de cálculo elaborada en la sección “Cálculo de pérdidas” cuyo resultado fue de 4442m como se ilustra a continuación:

**Figura 100**

*Perdidas de carga.*

Densidad( $\rho$ )	1.664311255	kg/m <sup>3</sup>			PROPIEDADES	INICIO
Viscosidad( $\mu$ )	1.34E-05	Pa*s			CALCULAR PERDIDAS	
Caudal (Q)	48.43	m <sup>3</sup> /h				
Longitud(L)	91.2	m				
Diametro (D)	0.02664	m				
Rugosidad( $\epsilon$ )	1.50E-05	m				
Accesorios	Codo Estándar 90°		ADICIONAR ACCESORIOS	QUITAR ACCESORIOS	Perdida de Carga (hf)	4442.0675 m
Cantidad actual	46				LIMPIAR	
Tipo					AGREGAR	BORRAR
Angulo		°				
Diametro Menor		m				
Diametro Mayor		m				

**Nota.** Resultado de la sección “Cálculo de pérdidas” para la tubería y accesorios de la red de vapor.

Las unidades de pérdidas de carga están relacionadas con la densidad del fluido, en este caso vapor, utilizando la ecuación de presión hidrostática. La presión que se pierde a través de las tuberías y los accesorios corresponde a 0.725bar, por lo que la presión de salida de la térmica para asegurar una presión al final de la línea de 3bar, deberá ser de 3.725 bar.

## 6.7 Espesor de aislante para la tubería de vapor

En primera instancia, para calcular el espesor necesario de aislante para la tubería de vapor se debe determinar cuánto vapor se condensa en la tubería sin ningún recubrimiento. Para esto se utiliza la sección de la hoja de cálculo “Aislamiento”, con el fin de calcular la pérdida de calor sin aislante, como se muestra a continuación:

**Figura 101**

*Calor perdido sin aislamiento.*

Temperatura Fluido	<input type="text" value="130"/>	°C	Espesor Aislante	<input type="text" value="0"/>	m
Temperatura Ambiente	<input type="text" value="8"/>	°C	<input type="button" value="CALCULAR AISLANTE"/>		
Diametro	<input type="text" value="0.02664"/>	m			
Tuberia	<input type="text" value="Acero al Carbon 1%C"/>				
Espesor Tuberia	<input type="text" value="0.00338"/>	m			
Aislante	<input type="text" value="Poliuretano"/>				
			<input type="button" value="LIMPIAR"/>	<input type="button" value="CALCULAR CALOR"/>	
					Calor Perdido <input type="text" value="0.107822938"/> kW/m

**Nota.** Resultado de la sección “aislamiento” para el servicio de vapor.

De acuerdo con los resultados, el calor perdido sin aislante será de 0.1078kW/m. Al multiplicarlo por la totalidad de la longitud de la red, se obtiene un calor perdido total de 9.83kW. Con este valor, se determina la masa de vapor que se condensa mediante la ruta termodinámica. Para ello, se tiene en cuenta un  $C_p=1.9995\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$  y un calor latente  $\Delta h_L$  de 2163.22 kJ/kg.[37] Para determinar la masa condensada se utiliza la siguiente ecuación:

Ecuación 38. Calor cambio de fase

$$\dot{Q} = \dot{m} * (C_p * \Delta T + \Delta h_L)$$

Despejando de la ecuación 38 la masa ( $\dot{m}$ ) y reemplazando los valores, da un resultado de 15.92 kg/h correspondiente al vapor que se condensa por la tubería. Con el fin de disminuir este valor, se propone el uso de un aislante que minimice el calor perdido. Asumiendo una masa de condensado de 0.00083 kg/s, utilizando la misma ecuación 38 se determina que el calor perdido debe ser 0.0203kW/m para los 91.2m de tubería. Este valor de calor se ingresa en la sección de “Aislamiento” y esta calcula el espesor de aislante requerido como se muestra en la siguiente figura:

## Figura 102

*Aislamiento.*

Temperatura Fluido	<input type="text" value="130"/>	°C	Espesor Aislante	<input type="text" value="0.023043126"/>	m
Temperatura Ambiente	<input type="text" value="5"/>	°C	<input type="button" value="CALCULAR AISLANTE"/>		
Diametro	<input type="text" value="0.02664"/>	m			
Tuberia	<input type="text" value="Acero al Carbon 1%C"/>				
Espesor Tuberia	<input type="text" value="0.00338"/>	m			
Aislante	<input type="text" value="Poliuretano"/>		Calor Perdido	<input type="text" value="0.0203"/>	kW/m
			<input type="button" value="CALCULAR CALOR"/>		
			<input type="button" value="LIMPIAR"/>		

**Nota.** Resultado de la sección "aislamiento" para el servicio de vapor.

Para la tubería de acero al carbón seleccionada para el servicio de vapor de la planta piloto, se recomienda el uso de un aislante en poliuretano con un espesor de 0.023m, con el fin de disminuir la masa de condensados dentro de la tubería.

## 7. CONCLUSIONES

Mediante la descripción de las unidades de proceso, las hojas de especificaciones y Manuales del fabricante. Se determina que las unidades que requieren vapor son: columna de destilación, extractor sólido-líquido y líquido-líquido, y tren de evaporación; con un flujo de vapor total de 80.6 kg/h. Todos los equipos requieren agua de proceso exceptuando el secador de bandejas; con un flujo total de agua de 9.58 m<sup>3</sup>/h. el caudal máximo de agua residual es de 16.03 L/s y volumen máximo de descarga: 594 L. Y el caudal de descarga de las duchas de emergencia es de 17.784m<sup>3</sup>/h.

Por otra parte, a través de una profunda revisión bibliográfica se determina la normatividad aplicable que debe ser cumplida para la planta piloto. En donde se destacan los Decretos 1541 de 1978 y 2811 de 1974 para consumo responsable de recursos naturales; Resolución 0631 de 2015 para la correcta disposición de los residuos generados; Medidas de seguridad; Sistema contra incendios y duchas de seguridad cuyo caudal de al menos 76l/min durante 15 min; Normativa de fabricación y calidad de la tubería según resolución 501 de 2017, normas técnicas colombianas NTC 1259, NTC 382, NTC 4897, NTC 1560 y correspondientes internacionales ASTM; Regulación de niveles máximos permisibles para la dispersión a la atmosfera para Emisión de gases; y Resolución para emisión de ruido dentro de lo establecido por la en el sector donde se encuentra.

En función de las metodologías de cálculo descritas y el lenguaje de programación Visual Basic se construye una herramienta de 7 secciones principales, la cual es capaz de determinar caudal, diámetro, perdidas de carga, propiedades de los fluidos, perdida de calor, espesor de aislamiento, presiones, potencia de bombeo y seleccionar la tubería adecuada.

Con ayuda de esta herramienta se diseña la red de servicios industriales para la planta piloto, la cual consta de: 95.2m de una tubería PVC con diámetro nominal de 40mm, 50 codos 90° y 30 conexiones en T para el servicio de agua de proceso; para la red de emergencia (duchas) se requieren 61m de tubería PVC con un diámetro nominal de 60mm, 23 codos 90° y 2 conexiones en T; para el agua residual se diseña un cárcamo de 10.5m de longitud, 3m de ancho y rejilla de 25cm para la descarga de los equipos.



Por otra parte, para la descarga de las duchas se considera tubería PVC con diámetro nominal de 73mm, una longitud de 18.9m y 7 codos de 90°; finalmente para el servicio de vapor se propone una tubería de 91.2m con diámetro nominal de 25mm de acero al carbón, 46 codos 90° y 21 conexiones en T, y un aislante de poliuretano con espesor de 23mm.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] *"Banco de reactores - Guía Técnica"*, Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018.
- [2] M. Karem *et al*, *Generalidades y aplicaciones del equipo absorción de gases gunt*. Bogotá, Colombia: EAN, 2018.
- [3] *"Planta de absorción de gases - Guía Técnica"*, Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018.
- [4] C. R. Medina *et al*, *Modelo y control de una columna de destilación continua*, tesis. Facultad de ingenierías, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2008.
- [5] *"Planta de destilación continua - Guía Técnica"*, Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018.
- [6] De Dietrich Process Systems. (s.f.). "Extracción líquido-líquido". [En línea] <https://www.dedietrich.com/es/soluciones-y-productos/extraccion/extraccion-liquido/liquido>
- [7] J. C. Palacios M., R. Sanchez V., *Diseño, contrucción y evaluacion de parámetros de operación de un equipo de extracción solido-liquido para el laboratorio de procesos unitarios de la facultad de ingeniería química de la Universidad Nacional del Centro del Peru*, tesis. Facultad de Ingenierias, Universidad Nacional del Peru, Huancayo, Peru, 2008.
- [8] *"Planta de extracción sólido líquido y líquido-líquido - Guía Técnica"*, Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2018.
- [9] P. F. Maupoey *et al.*, *Introducción al secado de alimentos por aire caliente*, Valencia, España: Universitat Politecnica de Valencia, 2001.
- [10] *"Secador de bandejas - Guía Técnica"*, Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2016.
- [11] Ingeniería alimentaria. (2019) "Experiencia aplicada en soluciones de evaporación y secado industrial". [En línea] [jalimentaria.com.ar](http://jalimentaria.com.ar)
- [12] *"Tren de evaporación - Guía Técnica"*, Process solutions and equipment PSE S.A.S, Bogotá, 2016.
- [13] Lenntech. (2020) "Agua de Proceso". [En línea]

<https://www.lenntech.com/applications/process/process.htm>

- [14] E. Shashi Menon, P. E., *Piping Calculations Manual*, 2ª ed., New York: McGraw-Hill, 2005.
- [15] G. Towler and R. Sinnott, *Chemical engineering design; Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*. Oxford, UK: Elsevier, 2008.
- [16] A. Henderson, "A fresh approach to systems design that delivers leaner and greener buildings," *Green Transition, Ingeniuty, Ramboll*, Abril 29, 2019.
- [17] SpiraxSarco, "*Líneas de Vapor*," 2020.
- [18] Tuvalrep, "*Tuberías y Accesorios*," 2020.
- [19] Ministerio de Agricultura, "*Decreto 1541 de 1978*," 1978.
- [20] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Diciembre 18, 1974) "*Decreto 2811 de 1974*"
- [21] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Marzo 17, 2015) "*Resolución 0631 de 2015*"
- [22] Semamcoin, (2021) "*Diferencias entre agua nebulizada y agua pulverizada*," Semamcoin Protección Contra Incendios". [En línea] <http://semamcoin.com/diferencias-entre-agua-nebulizada-y-agua-pulverizada/>
- [23] Icontec (Diciembre 16, 2012) "*Norma técnica colombiana 2885: extintores portátiles contra incendios*".
- [24] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (Agosto 04, 2017) "*Resolución 501 de 2017*".
- [25] Icontec. (Junio 21, 1989) "*Norma Técnica Colombiana 1259: Ingeniería civil y arquitectura. Instalación de tuberías para conducción de aguas sin presión*".
- [26] American Society for Testing and Materials, ASTM, "*ASTM A106*," 2019.
- [27] Acaire, "*Reglamento Técnico de Instalaciones Térmicas en Edificaciones*" Colombia, 2017. [PDF].
- [28] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Abril 4, 2006) "*Resolucion 0601 de 2006*".
- [29] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Septiembre 5, 2003) "*Resolución 1208 de 2003*".

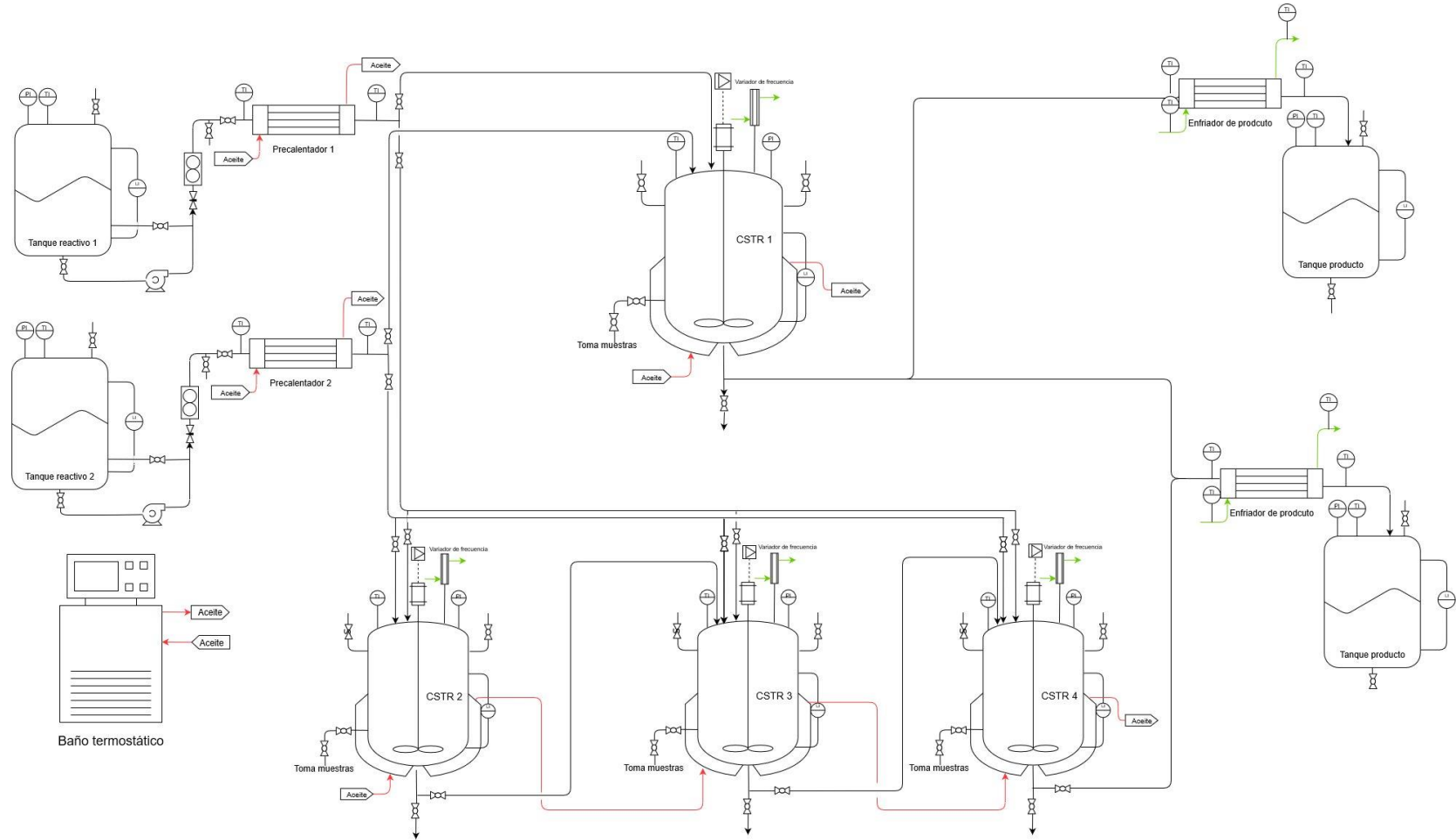
- [30] Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (Abril 7, 2006) "*Resolución 627 de 2006*".
- [31] Instituto Americano de Estándares. (2014) "*ANSI/ISEA Z358.1-2014*".
- [32] R. Perry, *Perry's Chemical Engineers Handbook*, 7a ed., McGraw-Hill, 1997.
- [33] Crane, *Flujo De Fluidos En Válvulas, Accesorios Y Tuberías*. México D. F: McGraw-Hill, 1987.
- [34] G. Towler and R. Sinnott, *Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design*, USA: Elsevier, 2008.
- [35] J. H. Lienhard IV and J. H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 5a ed., Phlogiston Press, 2019.
- [36] C. Nuttelman, "*Excel/VBA for Creative Problem Solving*," *Universidad De Colorado*, 2020.
- [37] Aspen plus, version 9. [Simulador]. Aspen tech, 2016.
- [38] National Institute of Standards and Technology. (2021), "NIST Database", [En línea]. <https://webbook.nist.gov/>
- [39] "PP Pipe & Fittings Ecology", Asahi Av, 2019.
- [40] "Pipe dimensions and weights," Tioga, 2015.
- [41] Y. Cengel and J. Cimbala, *Fluid Mechanics, Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2014.
- [42] Aspen Hysys version 9. [Simulador]. Aspen tech, 2016.

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. DIAGRAMAS

**Figura 103**

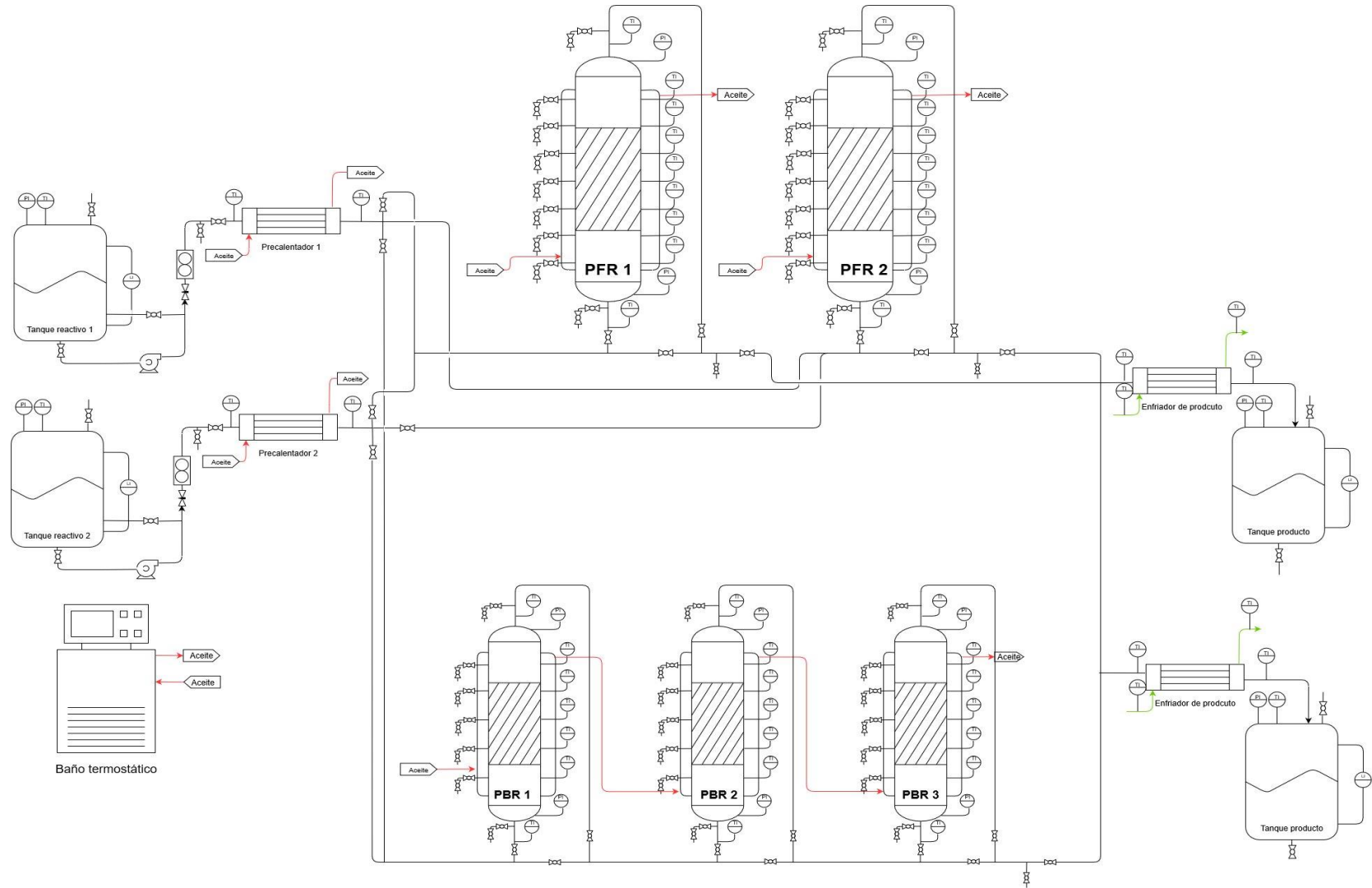
*Diagrama PFD del banco de reactores CSTR.*



**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones del Banco de Reactores CSTR.

**Figura 104**

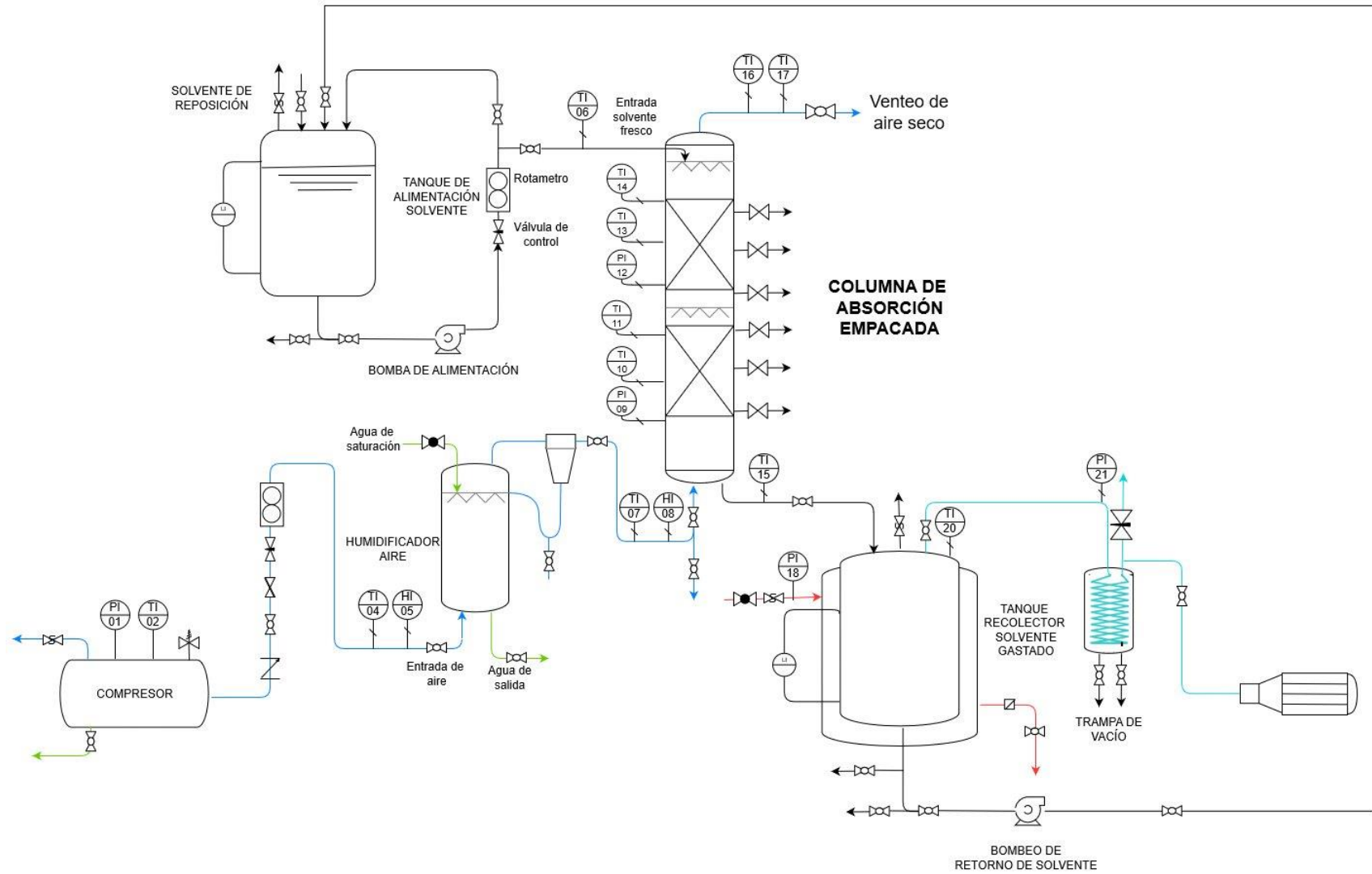
*Diagrama PFD del banco de reactores PFR.*



**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones del Banco de Reactores PFR.

**Figura 105**

*Diagrama PFD de la planta de absorción.*

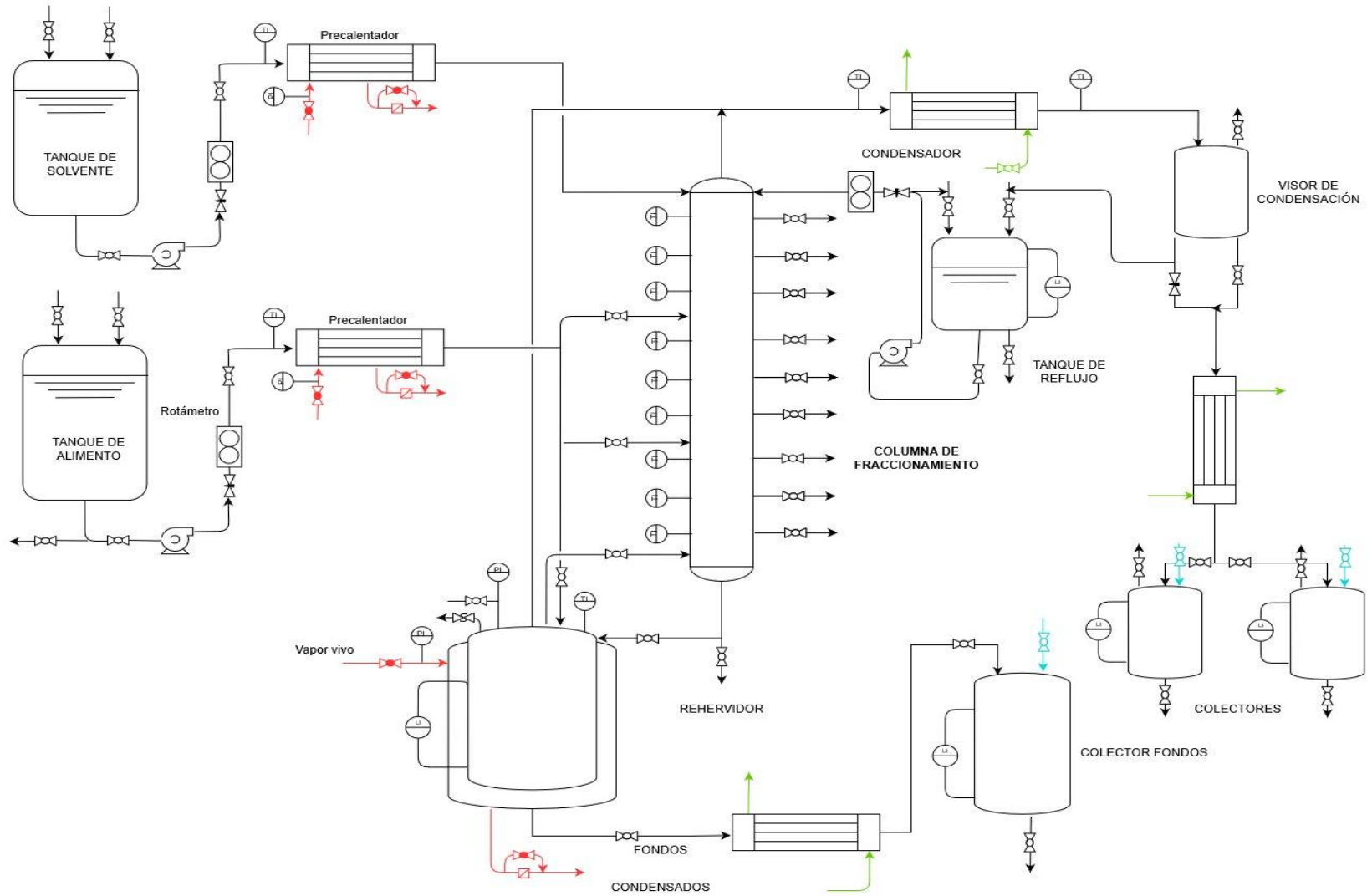


**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones de la planta de absorción.



**Figura 106**

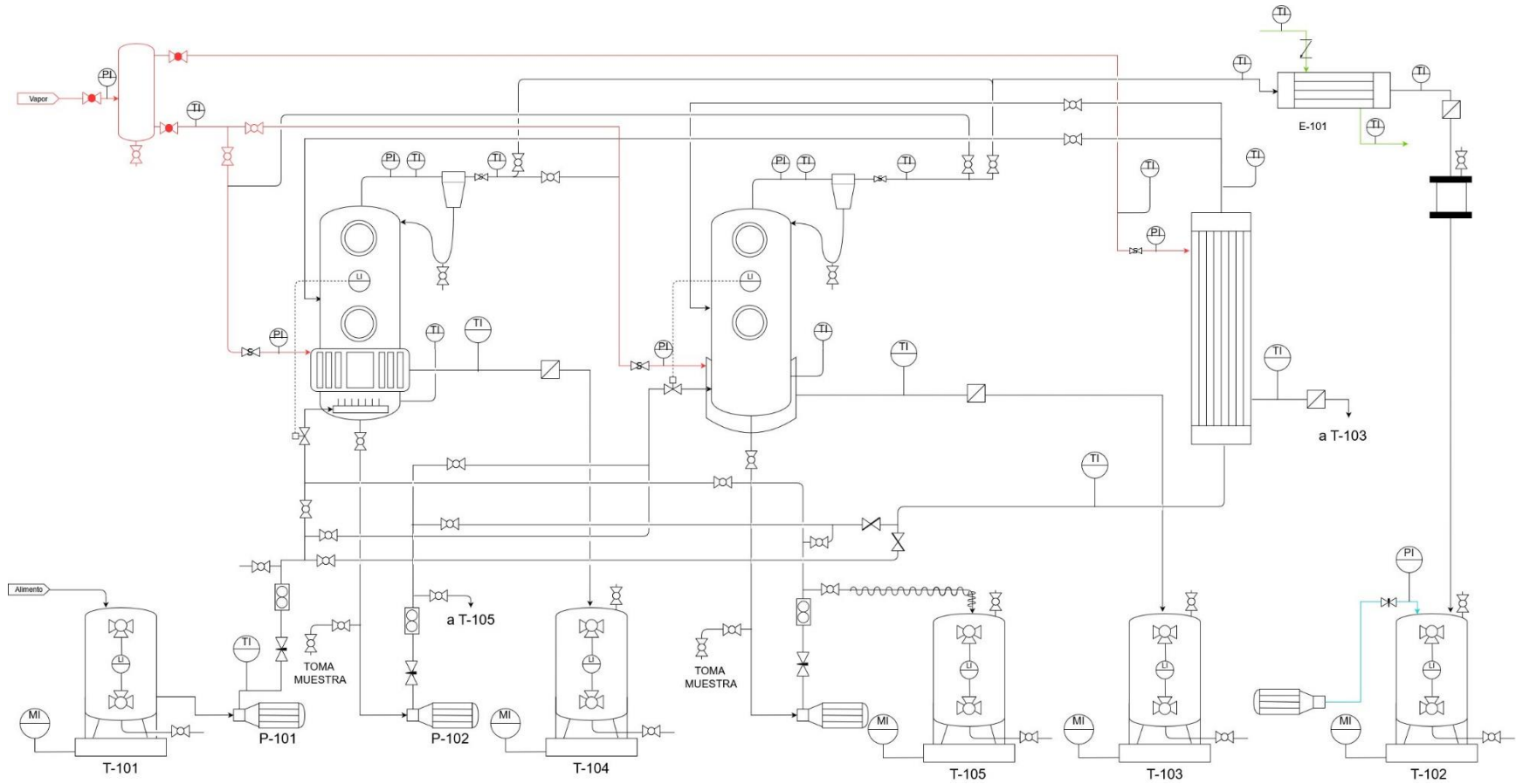
*Diagrama PFD de la planta de destilación.*



**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones de la planta de destilación.

## Figura 107

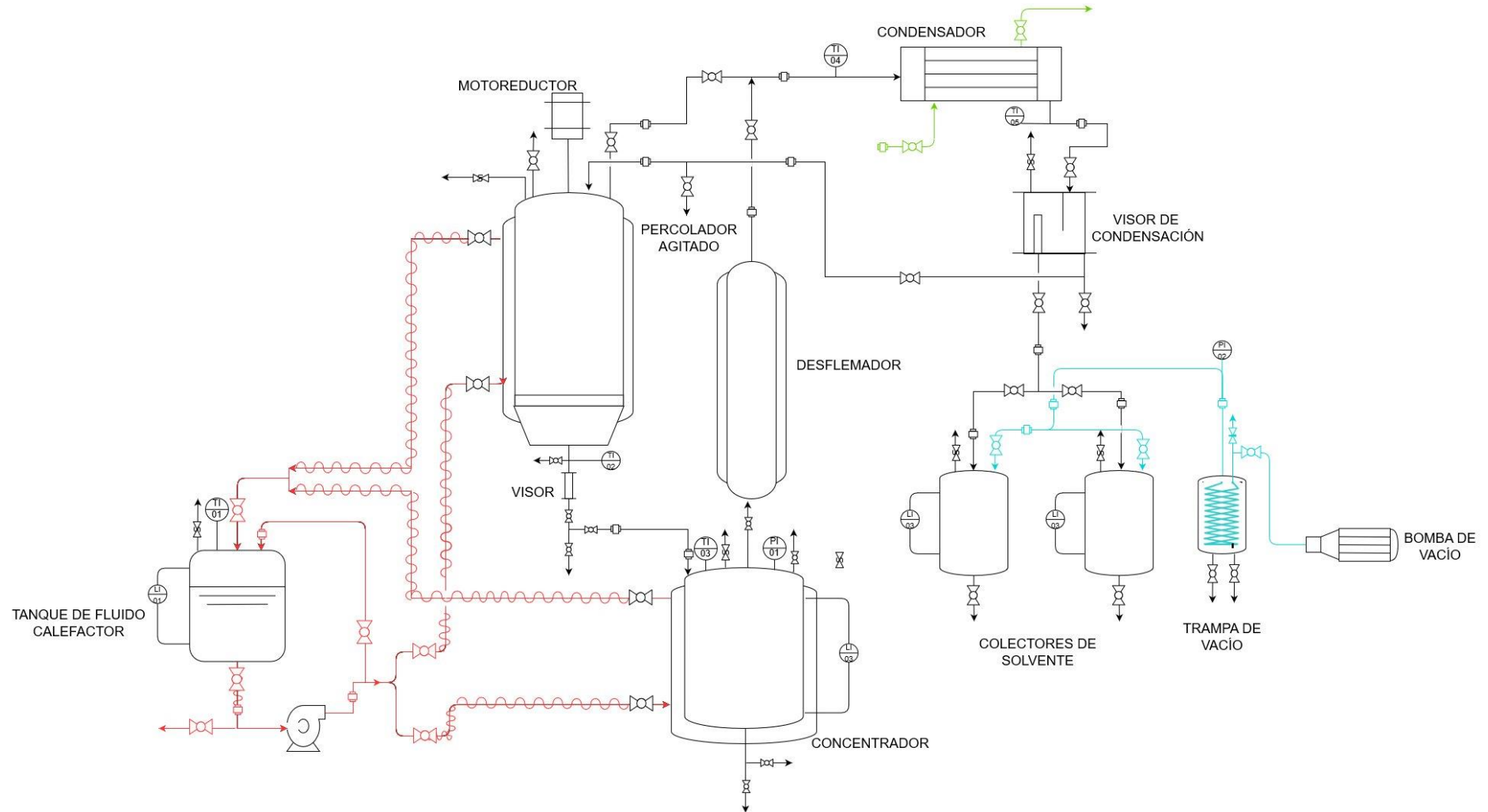
Diagrama PFD del tren de evaporadores.



**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones del tren de evaporadores.

**Figura 108**

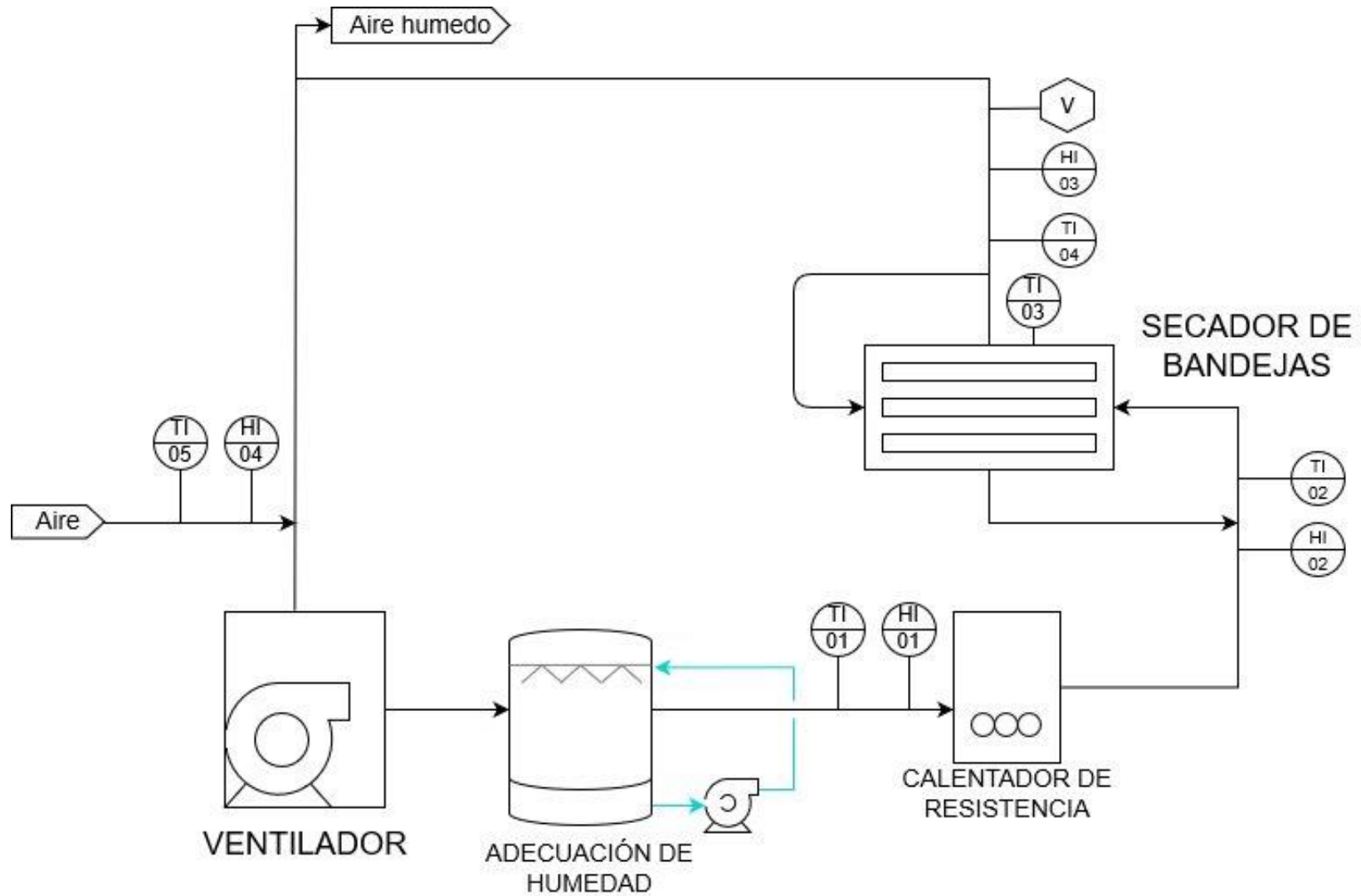
*Diagrama PFD de la planta de extracción sólido-líquido y líquido-líquido.*



**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones de la planta de extracción sólido-líquido y líquido - líquido.

**Figura 109**

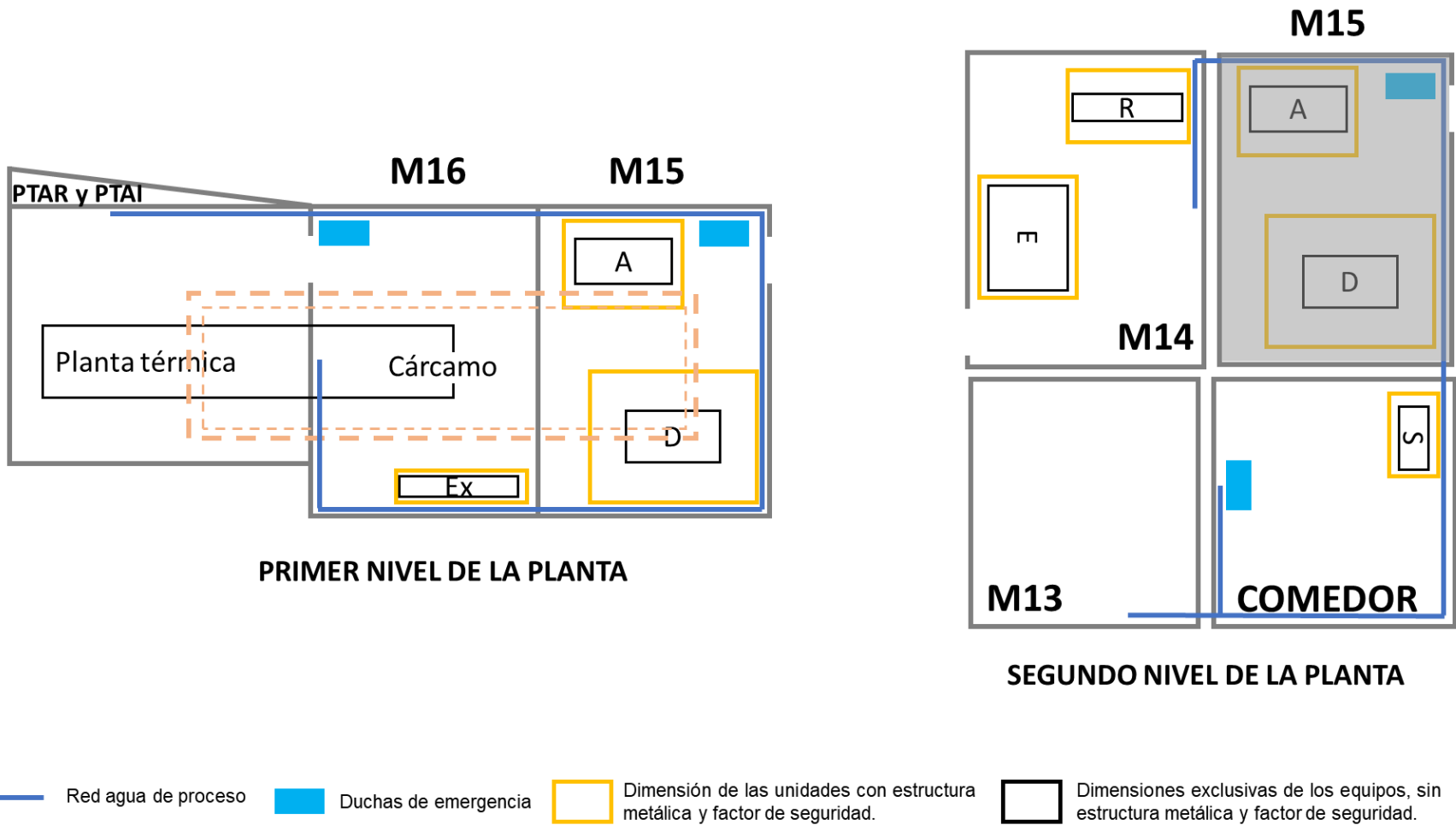
*Diagrama PFD del secador de bandejas.*



**Nota.** Diagrama PFD donde se muestra los componentes y conexiones del secador de bandejas.

**Figura 110**

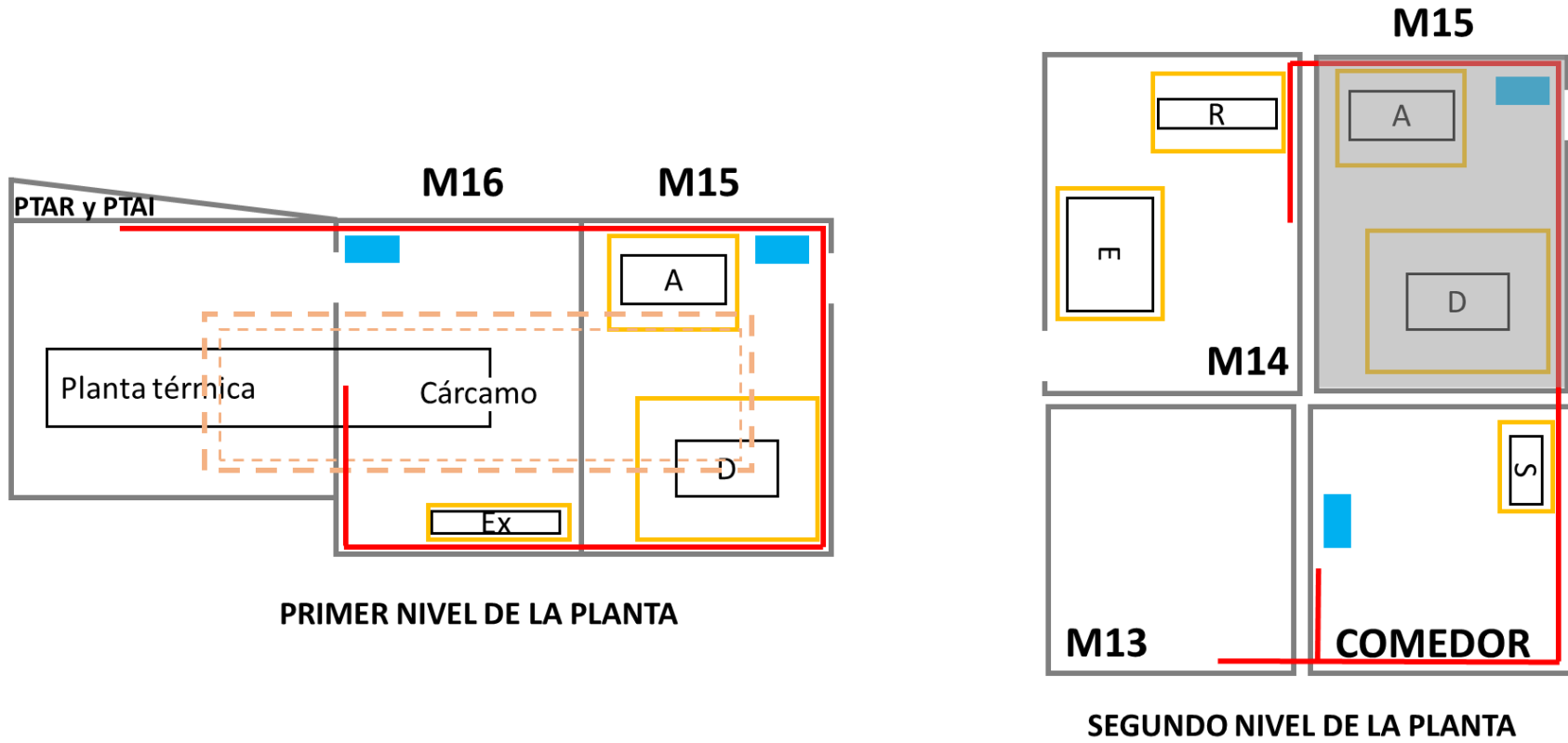
*Vista en planta de la red de agua de proceso para cada nivel de la planta piloto.*



**Nota.** Diagrama de la vista de planta, para la red de agua de proceso en cada nivel de la planta piloto.

**Figura 111**

*Vista en planta de la red de vapor para cada nivel de la planta piloto.*

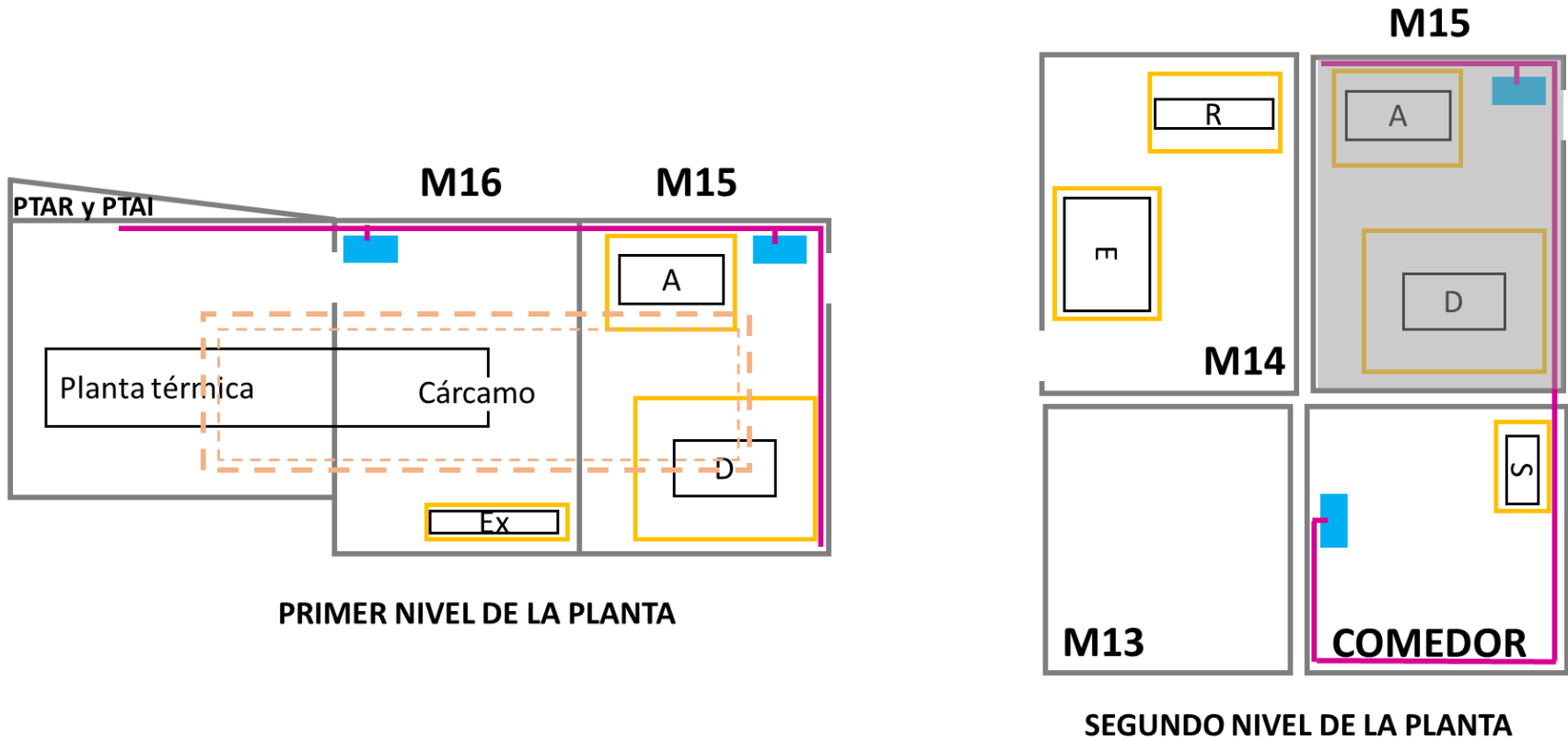


- Red de vapor
- Duchas de emergencia
- Dimensión de las unidades con estructura metálica y factor de seguridad.
- Dimensiones exclusivas de los equipos, sin estructura metálica y factor de seguridad.

**Nota.** Diagrama de la vista de planta, para la red de vapor en cada nivel de la planta piloto.

**Figura 112**

*Vista en planta de la red de agua de duchas de seguridad para cada nivel de la planta piloto.*

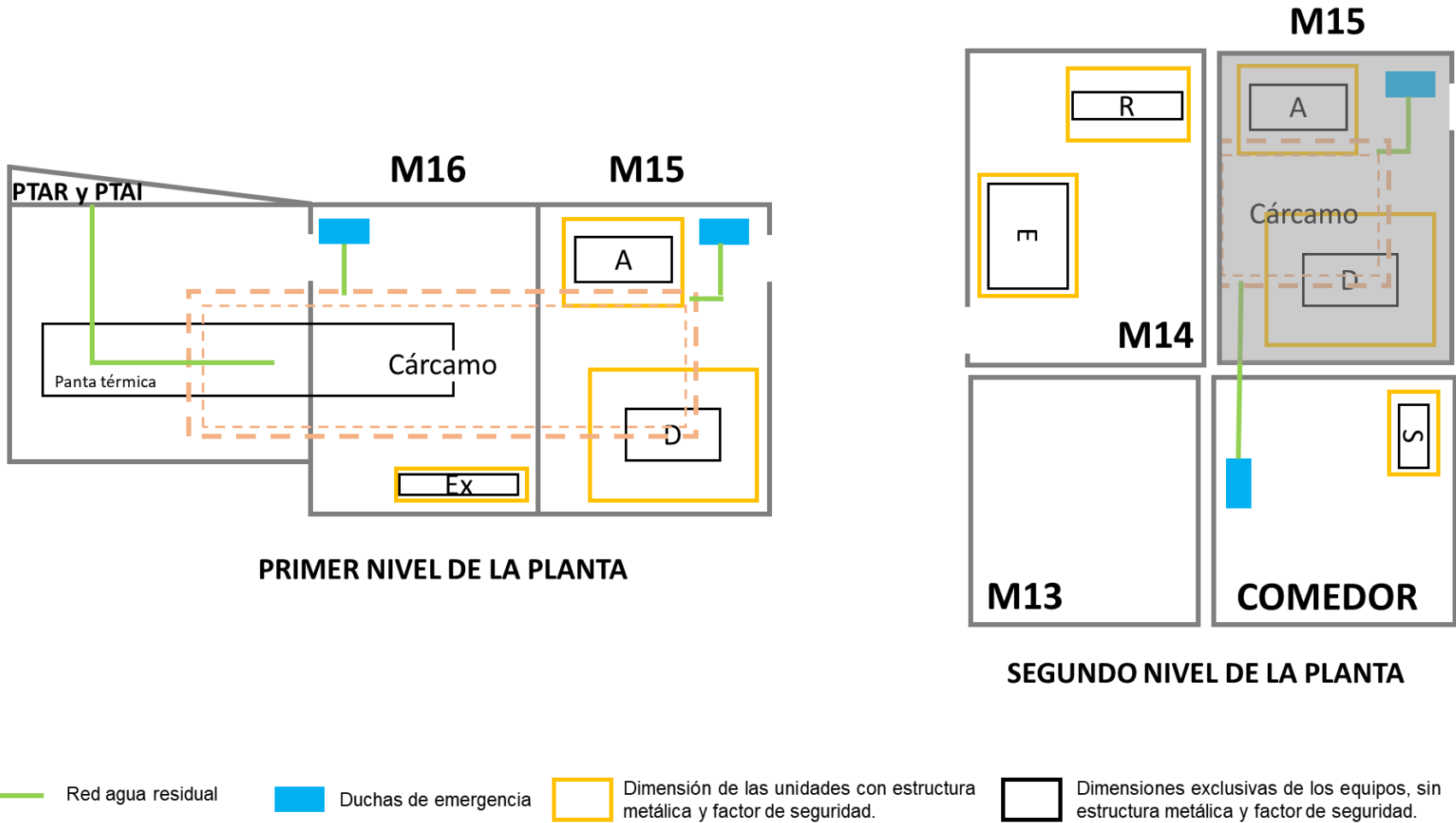


- Red agua de duchas de seguridad
- Duchas de emergencia
- Dimensión de las unidades con estructura metálica y factor de seguridad.
- Dimensiones exclusivas de los equipos, sin estructura metálica y factor de seguridad.

**Nota.** Diagrama de la vista de planta, para la red de agua de ducha en cada nivel de la planta piloto.

**Figura 113**

*Vista en planta de la red de agua residual de seguridad para cada nivel de la planta piloto.*



**Nota.** Diagrama de la vista de planta, para la red de agua residual en cada nivel de la planta piloto.



**ANEXO 2.**  
**TABLAS**

**Tabla 12**

*Tabla de Especificaciones técnicas adicionales para las unidades de proceso.*

Banco de Reactores	
Taqué alimentación	El tanque tiene un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en inoxidable, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/4" en acero inoxidable para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula de bola de 1/2", una conexión para termocupla y un sensor de presión. El tanque cuenta con un sistema de recirculación con el fin de realizar calibraciones de la bomba o purgas. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [1].
Reactores CSTR	El reactor es sellado con una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola en acero inoxidable para alivio de gases, conexión a condensador de reflujo, conexión para termocupla, sensor de presión, válvula de seguridad y una entrada para carga de sólidos. El tanque está constituido por un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2" internamente, el tanque cuenta con agitador de múltiples posiciones. El motor está acoplado a la tapa del tanque por medio de un sello mecánico que garantiza hermeticidad. El nivel de líquido dentro del tanque este fijo por el sistema de conducción de alimento [1].
Reactor Multitubular	removible acoplado con unión tipo "clamp", para carga de catalizador y, montaje y desmontaje rápido, construido en acero inoxidable 304. La sección principal cuenta con mallas de 1/2" en la parte superior e inferior para soportar el lecho. Cuentan con una coraza por donde circula el fluido de transferencia de calor, aislamiento térmico, y ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable. A lo largo del cuerpo del reactor se encuentran instaladas termocuplas tipo J. En la entrada y salida de reactor se encuentran instalados 2 toma muestras y sensores de presión, respectivamente. Cuenta con una válvula de acero inoxidable para descargar el sistema por gravedad [1].
Tanque Producto	Los tanques cuentan con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en acero inoxidable, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/4" en acero inoxidable para alivio atmosférico,

	una línea de entrada con válvula de bola de 1/2", una conexión para termocupla y un sensor de presión. Los tanques cuentan con un sistema de recirculación con el fin de realizar calibraciones de la bomba o purgas. Las ménsulas de soporte a la estructura son de acero inoxidable [1]. Así mismo, todos los sistemas de reacción cuentan con toma muestras y sensores de presión [1].
Sistema de Calentamiento	Para el sistema de calentamiento se ofrecen dos opciones, a convenir con el cliente, conexión a vapor o conexión a baño termostático. Se cuenta con reguladores de velocidad de agitación para cada uno de los reactores de tanque agitado [1].
Tablero control	Cuenta con botón de inicio-parada (energización del sistema), bombillos testigo (energización del sistema, encendido de bombas, sensores) y una parada de emergencia [1].
Planta de Absorción	
Compresor	El compresor cuenta con purga periódica del tanque acumulador, filtro de aire para remover partículas sólidas y aceites lubricantes, y línea de desagüe para remover las purgas de agua. Cuenta con manómetro y regulador de flujo a la entrada de la línea de aire [3].
Humidificación	Cuenta con cabezales flanchados con acoples rápidos, y un sistema de atomización de agua para garantizar saturación completa. Cuenta con conexiones de entrada y salida de gas y líquido en tubería de 1/4" de acero inoxidable y válvulas de bola [3].
Columna absorción	<p>La columna cuenta con 6 toma muestras para la fase líquida y visor de vidrio en el cuerpo principal. Igualmente tiene 4 sensores tipo J para determinar el perfil de temperaturas, y dos sensores de presión para medir la caída de presión en operación. Dichos sensores están conectados por cables al tablero de control.</p> <p>Entre las 2 secciones principales se encuentran el soporte del empaque, así como el re-distribuidor de líquido para evitar su canalización en las paredes. La sección inferior de la columna cuenta con una entrada para vapor de 1" y una salida por la parte inferior en tubería de 1/4" con válvulas en acero inoxidable para descarga y purga de la columna. La sección superior de la columna tiene una salida en tubería de 1" para venteo del aire seco. Igualmente incluye un acople de 1/4" para la entrada del solvente, con válvula de acero inoxidable [3].</p> <p>En cuanto a medidores y controladores, El sistema permite regulación manual de los flujos de gas y de solvente, por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros previamente calibrados. Las temperaturas en diferentes puntos del proceso se miden con termocuplas tipo J. Los sensores de presión son de alta precisión y operan de 0 a 4 bar. Se cuenta con sensores de humedad relativa en la línea de alimentación y descarga del aire; la información de los sensores se lleva a "displays" localizados en el tablero de control. El seguimiento de la operación se</p>

	<p>puede realizar a las dos corrientes del proceso, inicialmente se puede hacer medición del cambio de la humedad del gas entre la entrada y la salida del equipo; igualmente se puede hacer seguimiento por análisis de las muestras tomadas a lo largo de la columna y su concentración se establece por análisis rápido usando refractómetro [3].</p>
Almacenamiento solvente fresco	<p>El tanque de solvente fresco tiene tapa removible para llenado, válvula de retorno tipo bola de 1/2" en inoxidable, purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en inoxidable, y línea de descarga en el mismo tipo de válvula hacia el sistema de bombeo para alimentar la columna. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [3].</p>
Almacenamiento Solvente gastado	<p>El tanque de acumulación de solvente gastado cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en inoxidable, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/4" en acero inoxidable para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula de bola de 1/2", un acople a línea de vacío con válvula de bola de acero inoxidable de 1/2" y una conexión para termocupla. El tanque se encuentra aislado en fibra de vidrio. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [3].</p>
Sistema de vacío	<p>La trampa de vacío es un tanque cilíndrico en acero inoxidable con serpentín interno de 1/2". El tanque se carga con hielo y agua, que actúa como medio de enfriamiento para los gases condensables. La espiral y el tanque cuentan con purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [3].</p>
Tablero de control	<p>Cuenta con indicadores de temperaturas, un selector de termopares, 4 botones (energización del sistema, encendido de sistema de termopares, encendido bomba de solvente fresco, encendido bomba de recirculación de solvente gastado), 4 bombillos testigo (encendido de las 2 bombas, corriente de la caja eléctrica, corriente de sensores) y una parada de emergencia [3].</p>
Planta de Destilación	
Sistema alimentación	<p>El tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior con válvula, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. El tanque cuenta con válvula para alivio atmosférico, una línea de entrada, un acople a línea de vacío, una conexión para termocupla, y una entrada para llenado. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [5].</p>
Columna	<p>Las secciones están acopladas con flanche, empaques y tornillos y cuentan con aislamiento térmico. Cada sección está llena de empaque al azar de alta eficiencia en acero inoxidable. Igualmente, cada sección cuenta con 3 tomas muestras para la</p>

	fase líquida, 3 sensores de temperatura, y un visor de vidrio. La columna cuenta con un sensor de presión en los fondos. Dicho sensor está conectado por cables al tablero de control [5].
boiler	El rehedidor cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior con válvula, acoples con válvula para para alivio atmosférico, dos conexiones de entrada para retorno de la columna y alimentación, acoples para termocupla, sensor de presión, y una conexión para operación en destilación simple. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable.  el tanque colector cuenta con conexión para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula, un acople a línea de vacío con válvula, y una conexión para termocupla. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [5].
Reflujo	El tanque de reflujo cuenta con conexiones de entrada, de alivio y de descarga con válvula. El tanque está acoplado a una bomba para enviar el reflujo al tope de la columna.  Cada tanque cuenta con conexión para alivio atmosférico, una línea de entrada con válvula, un acople a línea de vacío con válvula, y una conexión para termocupla. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [5].
Regulación	El sistema cuenta con regulación manual de los flujos de alimentación, de reflujo y de vapor (en el caso de contar con vapor de caldera) por medio del uso de válvulas de aguja o globo, y rotámetros para líquidos previamente calibrados. Las temperaturas en diferentes puntos del proceso se miden con termocuplas tipo J o K. Los sensores de presión son transductores de alta precisión. La información de los sensores se lleva a un PLC localizado en el tablero de control y la información se presenta en pantalla. El sistema puede contar con calentamiento eléctrico o por vapor de servicio [5].
Tablero de control	Las temperaturas en diferentes puntos del proceso se miden con termocuplas tipo J o K. Los sensores de presión son transductores de alta precisión. La información de los sensores se lleva a un PLC localizado en el tablero de control y la información se presenta en pantalla. El sistema puede contar con calentamiento eléctrico o por vapor de servicio [5].
Planta de Extracción SL y LL	
Sistema calefacción	El tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior, válvula de alivio, conexión para termocupla y válvulas de carga y retorno. El tanque cuenta con una bomba centrífuga para la circulación de aceite a través del percolador y el concentrador [8].
Percolador	Cuenta con una tapa con cierre tipo “clamp”, sobre la cual está montada una línea de carga, una conexión para salida de vapores, una línea para retorno de solvente,

	<p>otra para alivio atmosférico y un moto-reductor de 1/8 hp para agitación nominal a 90 rpm [8].</p> <p>Igualmente cuenta con dos canastas removibles en acero con espacio para el agitador. Las canastillas tienen aperturas de 4 mm y 0.5 mm [8].</p>
Condensador	<p>con arreglos tipo TEMA</p> <p>Cuenta con sensores de temperatura en las boquillas de entrada y salida de las corrientes de proceso. Junto a un visor de condensación construido en vidrio con capacidad de 1 L. Tiene conexión superior de alivio y de entrada de fluido del proceso desde el condensador [8].</p>
Concentrador	<p>Cuenta con una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable, sobre la cual está montada la línea de carga, una conexión para salida de vapores hacia el condensador, conexión desde el percolador, alivio atmosférico, una conexión para termocupla y una conexión para manómetro. Cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo. En la parte inferior cuenta con una línea para purga y válvula para toma de muestras. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [8].</p>
Tanques colectores	<p>Cada tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo, purga inferior y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula para alivio atmosférico, una línea de entrada y un acople a línea de vacío. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [8].</p>
Trampa de vacío	<p>El tanque se carga con hielo y agua para el enfriamiento de los gases condensables. La espiral y el tanque cuentan con purga inferior. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable [8].</p>
Tablero de control	<p>Las temperaturas en el sistema son monitoreadas con 5 termocuplas tipo J, e identificadas sobre el tablero de control y las presiones en el sistema son medidas con 2 mano-vacuómetros de tipo Bourdon análogos.</p> <p>Cuenta con indicadores de temperaturas, botones para energización del sistema, encendido de bombas, encendido del variador de velocidad del agitador y encendido de resistencias. Cuenta con bombillos testigo de energización y un botón de parada de emergencia. Lateralmente cuenta con un tomacorriente de 110V para conexión de equipos externos [8].</p>
Secador de Bandejas	
Ventilador	<p>El ventilador cuenta con un variador de velocidad para regular el flujo de aire de secado [10].</p>
Calentador	<p>Las resistencias están ubicadas a la salida del ventilador y cuentan con un regulador de potencia que permite controlar la temperatura del aire de alimentación [10].</p>

Cámara de secado	La balanza se encuentra ubicada en la parte exterior, debajo de la cámara de secado. Las bandejas están construidas en malla tejida de acero inoxidable con apertura de 5mm. Sobre la cámara de secado se encuentra un sensor de temperatura [10].
Tablero de control	Cuenta con un controlador para el sistema de calentamiento del aire y 5 botones (energización del sistema, encendido de resistencias de calentamiento, encendido de sistema de termopares, encendido ventilador, encendido de bomba), con sus correspondientes bombillos testigos y una parada de emergencia. Y su estructura es modular construida en acero montada sobre ruedas para su fácil desplazamiento [10].
Tren de Evaporación	
Sistema alimentación	El tanque cuenta con ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable y está montado sobre una balanza. El tanque cuenta con las conexiones necesarias para alimentar cada uno de los evaporadores y para operar con sistema de circulación forzada. La temperatura del alimento es medida por una termocupla tipo J [12].
Evaporador de chaqueta	La cámara de evaporación cuenta con sensores de presión tipo Bourdon y de temperatura tipo J; y está conectada a un ciclón (aislado con fibra de vidrio). Cuenta con un control de nivel, compuesto por un medidor y una electroválvula que controla la entrada de flujo de alimento. La línea de vapor de calefacción cuenta con una válvula de alivio, un sensor de presión a la entrada, válvula de regulación, y una trampa de vapor en la línea de condensados [12].
Evaporador de calandria	El vapor producido es conducido a un eliminador de arrastre tipo ciclón aislado con fibra de vidrio para luego ser conducido al condensador o al siguiente efecto. La presión de la cámara se mide con sensor ubicado en la salida de vapor de la cámara, y la temperatura se mide con termocupla tipo J. El equipo cuenta con un control de nivel, compuesto por un medidor y una electroválvula que controla la entrada de flujo de alimento y la altura del licor en la calandria. La línea de vapor de calefacción cuenta con una válvula de alivio, un sensor de presión a la entrada, válvula de regulación, y una trampa de vapor en la línea de condensados [12].
Sistema almacenamiento producto	El sistema cuenta con toma muestras y sensor de temperatura con termocupla tipo J. El tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en inoxidable, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/4" en acero inoxidable para alivio atmosférico, una línea de entrada y una conexión para termocupla [12].
Sistema de condensados	Cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", una conexión para alivio atmosférico, una línea de entrada, un acople a línea de vacío con válvula de

	<p>aguja y una conexión para termocupla en la parte superior; conexión para purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en inoxidable. La línea de conexión entre el condensador y el tanque cuenta con un visor de condensación con capacidad de 1 L, con un arreglo de válvulas de bola de 1/2" en inoxidable para entrada de condensado, conexión atmosférica y salida a tanques de almacenamiento. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable y este sobre una balanza[12].</p> <p>Los condensados de vapor usado como fluido de calentamiento son conducidos a los tanques de condensados. El tanque cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2", purga inferior en línea de 1/2" con válvula de bola en inoxidable, y una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable. Sobre la tapa están montados: una válvula de bola de 1/4" en acero inoxidable para alivio atmosférico, una línea de entrada y una conexión para termocupla. Ménsulas de soporte a la estructura en acero inoxidable y este sobre una balanza [12].</p>
<p>Tablero de control</p>	<p>Las temperaturas en diferentes puntos del proceso se miden con termocuplas tipo J. Los sensores de presión son de alta precisión y operan de 0 a 4 bar. La información de los sensores se lleva a "displays" localizados en el tablero de control.</p> <p>Cuenta con indicadores de temperaturas, un selector de termopares, 6 botones (encendido bomba de vacío, encendido bomba de alimento, encendido bomba del evaporador # 1, encendido bomba del evaporador # 2, encendido de sistema de termopares, encendido de balanzas), 6 bombillos testigo (encendido de cada una de las bombas, corriente de la caja eléctrica, corriente de sensores) y una parada de emergencia [12].</p>

### **ANEXO 3.**

## **RECOMENDACIONES**

Este trabajo se basa en el estado inicial y los equipos que ya fueron adquiridos por la Fundación Universidad de América, pero el ideal de la Universidad es que siga creciendo con la compra en incorporación de nuevos equipos; así, como una conexión con laboratorios de diferentes departamentos como el de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Mecánica. Por ende, se estima una ampliación y sobre diseño, tomando espacios continuos como lo son el salón M13 y el antiguo comedor de profesores. Debido a esto, se recomiendan posteriores trabajos de este estilo en función de las adquisiciones futuras de la universidad y decisiones que sean tomadas.

Dado que este trabajo se fundamentó en los servicios de agua de proceso, agua residual y vapor, se recomienda realizar trabajos que complementen los servicios globales como lo son el servicio electricidad y aire comprimido; Así como el estudio más a profundidad de la operación de la planta térmica de carácter Piro-tubular. Además, se recomienda ampliar la herramienta programada en Excel para poder generar sensibilidades en esta, permitiendo comparar rápidamente varias alternativas.

Por otra parte, se recomienda realizar un estudio económico de la operación y puesto en marcha de la planta piloto, con el fin de establecer los requerimientos de capital para su funcionamiento.

Debido a que la ubicación de la planta piloto para la Fundación Universidad de América se plantea en el Ecocampus, es de vital importancia desarrollar futuros estudios y trabajos con el fin de mitigar el impacto de su operación al medio. Trabajos que incluyan bioclimática, análisis de los aspectos e impactos ambientales, técnicas para la mitigación o reducción de emisiones, efluentes y ruido (por ejemplo, el generado por un compresor); teniendo en cuenta el marco normativo y los límites especificados en este documento.

Así mismo, se recomienda para futuros estudios el aprovechamiento de los diferentes recursos renovables de la ubicación de la planta piloto. Utilizando las fuertes corrientes de viento, la radiación solar y demás factores que aporten a la sostenibilidad de la planta piloto y la Universidad como tal.