

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO PARA EL DIAGNOSTICO DE LAS  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE PLANTA DE EVAPORACIÓN BAJO  
CONDICIONES DE DISEÑO ESTABLECIDAS POR EL FABRICANTE

LUIS EDUARDO AYALA PADILLA

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BOGOTÁ, DC  
2019

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO PARA EL DIAGNOSTICO DE LAS  
CONDICIONES DE OPERACIÓN DE PLANTA DE EVAPORACIÓN BAJO  
CONDICIONES DE DISEÑO ESTABLECIDAS POR EL FABRICANTE

LUIS EDUARDO AYALA PADILLA

Proyecto Integral de Grado para optar el título de:  
INGENIERO QUÍMICO

Director

FELIPE CORREA MAHECHA

Ingeniero Químico

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

BOGOTÁ, DC

2019

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Felipe Correa Mahecha

---

Jaime Eduardo Arturo Calvache

---

Nubia Liliana Becerra Espitia

Bogotá D.C., febrero 2019

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

**Dr. JAIME POSADA DÍAZ**

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

**Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA**

Vicerrectora Académica y de Posgrado

**Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS**

Decano de Ingenierías

**Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI**

Director general de investigación y proyecto social

**Dr. MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ**

Director Programa Ingeniería Química

**Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ**

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.

La vida es un largo camino plagado de retos y sin duda alguna la universidad marca una pauta en la vida, es la base no solo para el entendimiento de la profesión en la cual me desenvolveré a lo largo de la vida, sino para lo concerniente al día a día y mi futuro personal. Le agradezco a todas las personas que de una u otra manera me han apoyado y servido como estandartes para poder seguir este camino en especial a mis padres por sus esfuerzos para que finalmente pudiera graduarme como un profesional integro, a mi hermana que ha estado siempre en el camino alentándome para no desfallecer al igual que NCS, la cual todos los días estaba a mi lado mientras realizaba este proyecto.

## Agradecimientos

Quiero agradecer en primera instancia al profesor Felipe Correa Mahecha por brindarme su apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto confiando en mí durante el proyecto, al grupo de métodos de separación no convencionales a la cabeza de profesor Jaime Arturo quienes han estado respaldando el proceso realizando las correcciones pertinentes y a todos y cada uno de los involucrados en este proceso tan arduo.

## CONTENIDO

	pág.
OBJETIVOS	22
INTRODUCCIÓN	24
1.GENERALIDADES	25
1.1 LA EVAPORACIÓN	25
1.2 EVAPORADOR	26
1.3 TIPO DE OPERACIÓN POR EFECTOS	27
1.3.1 Efecto simple.	27
1.3.2 Efecto múltiple con alimentación mixta.	28
1.3.3 Efecto múltiple con alimentación en retroceso.	29
1.3.4 Efecto múltiple con alimentación en paralelo.	30
1.4 TIPO DE CIRCULACIÓN	30
1.5 FACTORES QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN	31
1.5.1 Diferencia de temperaturas..	31
1.5.2 Área de transferencia de calor.	31
1.5.3 Resistencia a la transferencia de calor.	32
1.5.4 Coeficiente global de transferencia de calor (U).	32
1.6 EQUIPOS AUXILIARES DEL EVAPORADOR	32
1.6.1 Condensadores.	32
1.6.2 Bombas de vacío.	32
1.7 CAPACIDAD DE UN EVAPORADOR	32
1.8 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR	33
1.8.1 Coeficientes de película de vapor.	34
1.8.2 Coeficientes de líquido.	34
1.8.3 Coeficientes globales.	34
1.9 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE EVAPORACIÓN	35
1.10 CLASIFICACIÓN EVAPORADORES	36
1.10.1 Marmita abierta.	37



1.10.2 Evaporador de tubos horizontales.	38
1.10.3 Evaporador vertical de tubos cortos.	38
1.10.4 Evaporador de película descendente.	39
1.10.5 Evaporador de película agitada.	40
1.10.6 Evaporador de tubos verticales largos.	41
1.10.7 Evaporador de circulación forzada.	41
1.10.8 Evaporador de platos.	42
<b>2. CARACTERIZACIÓN DEL TREN DE EVAPORACIÓN (CONTROL MANUAL) REF. TE-M</b>	43
2.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ALIMENTO A EVAPORAR	44
2.1.2 Control de nivel.	46
2.1.3 Sistema de pesaje.	46
2.1.4 Termocupla tipo j.	47
2.1.5 Válvula de cheque.	47
2.2 TANQUES DE RECOLECCIÓN DE PRODUCTO CONCENTRADO Y CONDENSADO	49
2.2.1 Válvulas de bola.	50
2.2.2 Mirilla de vidrio.	50
2.3 EVAPORADOR DE CHAQUETA	51
2.3.1 Sensor de presión.	52
2.3.2 Ciclón	53
2.3.3 Electroválvula.	53
2.3.4 Válvula de alivio.	54
2.3.5 Trampa de vapor.	54
2.3.6 Válvula de globo.	54
2.3.7 Sistema de bombeo.	55
2.4 EVAPORADOR DE CALANDRIA VERTICAL (TUBOS VERTICALES)	57
2.4.1 Válvula de compuerta.	58
2.4.2 Rotámetros.	58

2.5 EVAPORADOR DE CALANDRIA HORIZONTAL	59
2.6 EVAPORADOR DE CIRCULACIÓN FORZADA	60
2.7 CONDENSADOR DE VAPOR	61
2.7.1 Válvula de aguja.	63
2.7.2 Bomba de vacío.	63
2.8 TABLERO DE CONTROL.	63
2.9 OPERACIÓN	63
3. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE TREN DE EVAPORACIÓN	73
3.1 MODELAMIENTO DE PROCESOS	73
3.1.1 Modelamiento matemático.	74
3.1.2 Modelamiento matemático de un evaporador.	74
3.1.3 Modelado evaporador de triple efecto.	75
3.1.4 Análisis de grados de libertad.	80
3.1.5 solución algebraica.	81
3.2 SIMULACIÓN DE PROCESOS	91
3.2.1 Simulación estacionaria y dinámica.	91
3.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN	92
3.4 MODELO TERMODINÁMICO	93
3.5 DESCRIPCION, ESPECIFICACIÓN DE CORRIENTES Y CONDICIONES DE ENTRADA	95
3.5.1 Proceso de simulación.	96
3.6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.	98
3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS	100
3.7.1 Efecto del aumento en la presión del vapor vivo.	100
3.7.2 Efecto del aumento en la temperatura del alimento.	100
3.7.3 Efecto de la disminución de presión en los evaporadores.	101
3.7.4 Efecto del aumento en la temperatura del primer evaporador.	102
4.GUÍA PLANTA PILOTO TREN DE EVAPORACIÓN	104
4.1 GUÍA INTRODUCTORIA AL MANEJO TREN EVAPORACIÓN	104

4.1.1 Implementos.	104
4.1.2 Costo de la práctica.	105
4.1.3 Normas de seguridad en el laboratorio.	106
4.1.4 Señalización y demarcación de áreas de trabajo.	107
4.1.5 Identificación de tuberías y servicios.	111
4.1.6 Precauciones al momento de operar el equipo.	111
4.2 ARRANQUE DEL EQUIPO	113
4.2.1 Protocolo de operación del tren de evaporación.	113
4.2.2 Arranque tanque alimentación.	116
4.3 SELECCIÓN DE SUSTANCIA A EVAPORAR	116
4.3.1 Corrosión.	116
4.3.2 Costos.	120
4.3.3 Disposición de residuos.	122
4.4 GUÍA EXPERIMENTAL TREN DE EVAPORACIÓN.	124
5. CONCLUSIONES	125
6.RECOMENDACIONES	127
BIBLIOGRAFÍA	128
ANEXOS	135

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Especificaciones balanzas	46
Tabla 2. Características termocupla tipo J	47
Tabla 3. Válvulas en los sistemas de bombeo	56
Tabla 4. Manifolds del sistema de bombeo	56
Tabla 5. Configuraciones para el tren de evaporación	64
Tabla 6. Parámetros de entrada simulación	82
Tabla 7. Resultados Teóricos corrientes líquidas	90
Tabla 8. Resultados teóricos corrientes de vapor	91
Tabla 9 Parámetros de entrada al simulador	96
Tabla 10. Resultados simulación corrientes líquidas	98
Tabla 11. Resultados simulación corrientes de vapor	98
Tabla 12. % de error para las corrientes líquidas	99
Tabla 13. % de error para las corrientes de vapor	99
Tabla 14. Significado de colores en las señales	108
Tabla 15. Identificación de tuberías	111
Tabla 16. Composición química del acero inoxidable 304	117
Tabla 17. Propiedades del Teflón PTFE	118
Tabla 18. Propiedades de EPDM	118
Tabla 19. Sustancias que no causan corrosión	119
Tabla 20. Precios de sustancias a evaporar	120
Tabla 21. Sustancias preseleccionadas para evaporar	122
Tabla 22. Límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales	123
Tabla 23 Valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales	124
Tabla 24. Variables a recolectar durante la operación	193
Tabla 25. Fórmulas que deben ser usadas para calcular calor perdido	195
Tabla 26. Datos de la variable masa que deben ser recolectados	207
Tabla 27. Datos de la variable presión que deben ser recolectados	207
Tabla 28. Datos de la variable temperatura que deben ser recolectados	208
Tabla 29. Coeficiente global de transferencia de calor	209
Tabla 30. Fórmulas para calcular calor perdido	211

## LISTA DE GRÁFICAS

	pág.
Gráfico 1. Efecto del aumento de la presión de vapor vivo en la composición del producto	100
Gráfico 2. Efecto del aumento de la temperatura del alimento en la composición del producto	101
Gráfico 3. Efecto de la disminución de la presión en los evaporadores sobre la concentración del producto	102
Gráfico 4. Efecto de temperatura de operación del evaporador en la fracción másica del producto	103

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama de bloques evaporación.	25
Figura 2. Evaporador	26
Figura 3. Diagrama de evaporador de simple efecto.	27
Figura 4. Efecto múltiple con alimentación mixta	28
Figura 5. Efecto múltiple con alimentación en retroceso	29
Figura 6. Efecto múltiple con alimentación en paralelo	30
figura 7 resistencias presentes en la evaporación.	34
Figura 8. Evaporador de marmita abierta	37
Figura 9. Evaporador de tubos Horizontales	38
Figura 10. Evaporador de tubos verticales	39
Figura 11. Evaporador de película descendente	40
Figura 12. Evaporador de circulación forzada	42
Figura 13. Tren de evaporación Fundación Universidad de américa.	43
Figura 14. Tanque de alimentación	44
Figura 15. Sistema de bombeo	45
Figura 16. Componentes de válvula check	48
Figura 17. Tanque de producto y condensado	49
Figura 18. Evaporador de chaqueta	51
Figura 19. Ciclón	53
Figura 20. Sistema de bombeo	55
Figura 21. Evaporador de calandria vertical	57
Figura 22. Rotámetro	58
Figura 23. Evaporador de calandria horizontal	59
Figura 24. Evaporador de circulación forzada	60
Figura 25. Condensador de vapor	61
Figura 26. Tanque de recolección de condensados	62
Figura 27. PFD Evaporador calandria vertical	65
Figura 28. PFD Evaporador de calandria horizontal	66
Figura 29. PFD evaporador de chaqueta efecto simple	67
Figura 30. PFD evaporador de circulación forzada	68
Figura 31. PFD evaporación de doble efecto con alimentación en paralelo	69
Figura 32. PFD Evaporación doble efecto con alimentación en contra corriente.	70
Figura 33. PFD Evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo	71
Figura 34. PFD Evaporación de triple efecto con alimentación en contra corriente	72
Figura 35. PFD Evaporación de triple efecto con alimentación mixta	72
Figura 36. Esquema evaporación de triple efecto	75
Figura 38. Metodología cálculo de cantidad de vapor vivo requerida	81

Figura 37. Selección método a partir de propiedades termodinámicas	93
Figura 39. Esquema tren de evaporación en Aspen Plus	97
Figura 40. Esquema para cálculo de agua de servicio	106
Figura 41. Identificación de forma geométrica en las señales	109
Figura 42. Peligro de explosión	109
Figura 43. Riesgo eléctrico	109
Figura 44. Superficie caliente	109
Figura 45. Riesgo de caída de objetos	109
Figura 46. Lavaojos de emergencia	110
Figura 47. Ducha de emergencia	110
Figura 48. Primeros auxilios	110
Figura 49. Ruta de salida	110
Figura 50. Ruta de evacuación	110
Figura 51. Salida de emergencia	110
Figura 52. Uso obligatorio de guantes	110
Figura 53. Uso obligatorio de tapabocas	110
Figura 54. Uso obligatorio de overol	110
Figura 55. Uso obligatorio de guantes	110
Figura 56. Válvulas de purga y toma muestras	113
Figura 57. Válvulas de distribución de flujo	114
Figura 58. Ubicación mirillas de vidrio	115
Figura 59 Esquema de un evaporador	187
Figura 63. Evaporador de simple efecto	188
Figura 64. Operación evaporador simple efecto	192
Figura 65. volumen de control sobre un evaporador.	193
Figura 59. Esquema de un evaporador	197
Figura 60. Evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo	202
Figura 61. Evaporador de triple efecto con alimentación en paralelo	206
Figura 62. Volumen de control en evaporador de triple efecto.	208

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Sistema de documental para la caracterización del tren de evaporación FUA	136
Anexo B. Lista de chequeo especificaciones técnicas de bombas	138
Anexo C. Lista de verificación de elementos de medición instalados en el tren de evaporación.	139
Anexo D. Lista de verificación evaporadores	142
Anexo E. Ficha técnica trampa de vapor	144
Anexo F. Especificaciones técnicas rotámetros	144
Anexo G. Ficha técnica válvulas de alivio	145
Anexo H. Ubicación válvulas de bola	146
Anexo I. Ubicación válvulas de alivio	147
Anexo J. Ubicación válvulas de globo	148
Anexo K. Ubicación válvulas de compuerta	149
Anexo L. Ubicación válvulas de cheque	150
Anexo M. PFD tren de evaporación	151
Anexo M. PFD tren de evaporación sección a	152
Anexo M. PFD tren de evaporación sección b	153
Anexo M. PFD tren de evaporación sección c	154
Anexo M. PFD tren de evaporación sección d	155
Anexo M. PFD tren de evaporación sección f	156
Anexo M. PFD tren de evaporación sección e	157
Anexo N. Notas PFD tren de evaporación	158
Anexo O. Identificación de instrumentos del tren de evaporación	159
Anexo P. Compatibilidad de sustancias químicas con material fabricación tren evaporación	160
Anexo Q. Compatibilidad de sustancias químicas proporcionadas por el fabricante	180
Anexo R. Guía experimental 1 evaporación efecto simple	186
Anexo S. Guia experimental 2 evaporación de triple efecto con alimetnación en paralelo	196



## LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1 velocidad de transferencia de calor	33
Ecuación 2. Balance de energía para un sistema general	76
Ecuación 3. conservación general de la energía	77
Ecuación 4 Trabajo realizado al sistema	77
Ecuación 5 Balance de energía incluyendo el termino de trabajo eléctrico y de eje	77
Ecuación 6. Balance de energía con inclusión de entalpía	77
Ecuación 7. Simplificaciones al balance de energía	77
Ecuación 8 Balance de energía tren de evaporación primer efecto	77
Ecuación 9. Balance de materia primer efecto	78
Ecuación 10. Balance de soluto primer efecto	78
Ecuación 11. Balance de energía en estado estacionario efecto 1	78
Ecuación 12. Balance de materia en estado estacionario efecto 1	78
Ecuación 13. Balance de soluto en estado estacionario efecto 1	78
Ecuación 14. Cálculo de entalpía alimento corrientes sin cambio de fase	78
Ecuación 15. Cálculo de entalpía concentrado 1 corrientes sin cambio de fase	78
Ecuación 16. Balance energía final primer efecto	78
Ecuación 17. Balance de energía segundo efecto	78
Ecuación 18. Balance de materia efecto 2	79
Ecuación 19. Balance de soluto efecto 2	79
Ecuación 20. Balance de energía tercer efecto	79
Ecuación 21. Balance de materia tercer efecto	79
Ecuación 22. Balance de soluto tercer efecto	79
Ecuación 23. Elevación del punto de ebullición	79
Ecuación 24. Capacidad calorífica corrientes líquidas	79
Ecuación 25. Temperatura con EPE	82
Ecuación 26. Balance de materia global sacarosa	82
Ecuación 27. Balance de materia global	83
Ecuación 28. Cambio de temperatura global del sistema	83
Ecuación 29. Cambio de temperatura en cada efecto.	84
Ecuación 30 Temperaturas de ebullición reales	84
Ecuación 31. Entalpía de vapor	85
Ecuación 32. Calor latente de condensación	86
Ecuación 33. Requerimientos de calor para evaporación	87
Ecuación 34. Área de transferencia de calor	87
Ecuación 35. Porcentaje de error en áreas	87
Ecuación 36. Cambio en la temperatura corregida	88
Ecuación 37. Cantidad de gasolina requerida para el proceso de evaporación	105

Ecuación 38. Costo energía eléctrica	105
Ecuación 39. Costo agua de servicio	106
Ecuación 40 Coeficiente global de transferencia de calor.	194
Ecuación 41 Economía del proceso	210
Ecuación 42. Calor perdido en el proceso	210

## NOMENCLATURA

U: Coeficiente global de transferencia de calor	$W/m^2$
q: Velocidad de transferencia de calor	$kW$
A: Área de transferencia de calor	$m^2$
$\Delta T$ : Diferencia e temperatura	$^{\circ}C$ o $K$
Cp: Calor específico	$kJ/(kg * K)$
EPE: Elevación punto ebullición	$^{\circ}C$
i: Número de evaporador	
$V_i$ : Flujo de vapor efecto i	$kg/h$
$\Delta T'_{total}$ : Diferencia de temperatura global segunda iteración	$^{\circ}C$
$\Delta T_i^{COR}$ : cambio de temperatura corregida en cada evaporador	$^{\circ}C$
$m_v$ : Masa de solvente evaporado	$kg$
$m_s$ : Masa de vapor vivo	$kg$
S: Vapor vivo	
$\lambda$ : Calor latente	$kJ/kg$
$T_{Vi}$ : Temperatura de vapor i	$^{\circ}C$
F: Alimento	
H: Entalpía	$kJ/kg$
C: Condensado	
P: Producto	
CS: sub enfriado	
$X_{azucar}$ : Fracción másica de azúcar	
$F_L$ : Flujo de líquido	$kg/h$
$F_{LEi}$ : flujo de líquido efecto i	$kg/h$
$\Delta T_G$ : Cambio de temperatura global del sistema	$^{\circ}C$
$H_{sat vi}$ : Enalpía de vapor saturado efecto i	$kJ/kg$
$\bar{A}$ : Área promedio	$m^2$
$Q_P$ : calor perdido	$kW$

## GLOSARIO

**BYPASS:** vía alterna instalada con el fin de evitar el paso de fluido para hacer mantenimiento.

**CALANDRIA:** sistema instalado dentro del evaporador que soporta los tubos que se encuentran instalados en la zona de transferencia de calor.

**CALOR LATENTE:** alude al calor que, al ser recibido por un cuerpo, no incrementa su temperatura, sino que es utilizado para que se produzca un cambio de estado.

**CALOR SENSIBLE:** cantidad de calor que absorbe o libera un cuerpo sin que en el ocurran cambios en su estado físico (cambio de fase).

**CAVITACIÓN:** formación de burbujas de vapor en un fluido.

**CHAQUETA:** sistema de calefacción externa que rodea un tanque.

**CONCENTRAR:** evaporar solvente presente en la solución

**CONDENSAR:** cambio de fase de vapor a líquido.

**CONDUCCIÓN DE CALOR:** mecanismo de transferencia de energía calorífica entre dos sistemas, basado en el contacto directo de sus partículas sin flujo neto de materia y que tiende a igualar la temperatura dentro de un cuerpo o entre diferentes cuerpos en contacto, por medio de transferencia de energía cinética de las partículas.

**CONSIGNA:** parámetro de diseño fijado en un sistema.

**EBULLICIÓN:** proceso físico en el que la materia pasa a estado gaseoso. Se da cuando la temperatura de la totalidad del líquido iguala al punto de ebullición del líquido a esa presión.

**EFFECTO:** número de veces que se reutiliza el vapor vivo en el tren de evaporación, número de evaporadores presentes en el tren de evaporación

**EVAPORACIÓN:** proceso físico que consiste en el paso lento y gradual de un estado líquido hacia un estado gaseoso, tras haber adquirido suficiente energía para vencer la tensión superficial.

**EVAPORADOR:** intercambiador de calor capaz de hervir la solución y un dispositivo para separar la fase vapor del líquido en ebullición.

**FLANCHE:** tipo de unión que permite asegurar una parte móvil a un sistema, permitiendo la fácil apertura para su limpieza.

**FOULING:** capa de material sólido que genera una resistencia a la transferencia de calor.

**INCRUSTACIÓN:** capa de material sólido que genera una resistencia a la transferencia de calor.

**MANIFOLD:** arreglo de válvulas que permite el paso a diferentes equipos dentro de un sistema.

**MARMITA:** recipiente metálico que posee una tapa con sello hermético que impide que el vapor se salga.

**OPERACIÓN UNITARIA:** proceso de transformación donde hay un intercambio del tipo físico, de una materia prima en otro producto de características diferentes.

**SOBRE SATURACIÓN:** momento que sucede cuando se añade suficiente cantidad de soluto a un solvente y el mismo no puede ser disuelto en el solvente.

**SOLUTO:** compuesto de menor proporción al solvente en una disolución.

**SOLVENTE:** sustancia que permite la dispersión de otra sustancia en esta a nivel molecular o iónico. Es el medio dispersante de la disolución, generalmente es agua.

**TERMO SENSIBILIDAD:** susceptibilidad de un material a cambios de temperatura.

**VAPOR VIVO:** vapor producido en una caldera.

**VISCOSIDAD:** oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales. Muestra una tendencia de oposición de fluir ante la aplicación de una fuerza.

**VOLANTE:** perilla o llave que permite accionar una válvula.

**VOLATILIDAD:** facilidad con la que una sustancia se evapora.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Plantear la metodología para el diagnóstico del banco de evaporadores de la planta piloto de la Fundación Universidad de América bajo las condiciones de operación establecidas por el fabricante.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Establecer los procedimientos para la Caracterización operacional del banco de evaporadores de la planta piloto a partir de la información suministrada por el fabricante.
- Desarrollar un modelo matemático para simular el funcionamiento del tren de evaporadores, empleando ASPEN.
- Elaborar una guía de prácticas para el uso del tren de evaporadores en la planta piloto, con el fin de impartir docencia.

## RESUMEN

En la misión de impartir docencia la Fundación Universidad de América ha adquirido equipos de tecnología aplicada para el programa de ingeniería química con el fin de poner a prueba los conocimientos teóricos adquiridos a lo largo de la carrera por parte de sus estudiantes, sirviendo estos como herramienta didáctica que aproxima a los mismos a un escenario de planta real de trabajo. Es así como en el presente trabajo se realiza un planteamiento metodológico que pretende generar herramientas que permitan diagnosticar el tren de evaporación de triple efecto adquirido por la universidad. Para esto se realizaron listas de chequeo consignadas en un listado maestro de documentos que permiten realizar la verificación de los elementos que componen el equipo comprado, adicionalmente se realizó la simulación de dicho tren de evaporación en el programa Aspen Plus el cual fue validado con literatura obteniendo porcentajes de error de un orden del 1%. Producto de ello se generó un tutorial con el cual los estudiantes podrán basarse para realizar procesos de optimización de la planta y, por último, se desarrollaron dos guías experimentales en las que se pone al estudiante en un escenario denominado juego de roles, en el cual se asume un papel y se cumplen con tareas específicas asignadas dentro del contexto de una planta de concentración de soluciones por evaporación.

**Palabras clave:** Tren de evaporación, Simulación, Aspen Plus, Caracterización, Guías experimentales, Juego de roles.

## INTRODUCCIÓN

El presente proyecto de investigación comprende el diseño metodológico para el diagnóstico de las condiciones de operación Establecidas por el fabricante de un tren de evaporación a escala piloto compuesto por evaporadores de calandria vertical, horizontal y de chaqueta, el cual fue adquirido por la Fundación Universidad de América en el presente año.

La importancia de realizar la investigación radica en la generación de metodologías que permitan realizar la identificación de los diferentes componentes presentes en la planta de evaporación. Para desarrollar esta tarea, se debe realizar una caracterización al equipo con el fin de conocer e identificar el funcionamiento y así poder sentar bases para la optimización de los mismos, así como sacar el mayor provecho del tren de evaporación con prácticas educativas que promuevan la interacción entre los estudiantes realizando una primera aproximación a la industria.

El juego de roles es una herramienta educativa innovadora implementada en las prácticas de laboratorio que fortalece la diversidad, el apoyo mutuo y las relaciones en términos de igualdad, ya que este juego no es de carácter competitivo porque necesita de la colaboración de los demás integrantes del grupo para alcanzar las metas que individualmente son más difíciles de lograr.<sup>1</sup>

La evaporación cobra una vital importancia en la industria colombiana ya que según pro-Colombia en un estudio realizado en 2015 existe una alta demanda de concentrados de fruta (entre el 24 y el 99%) en Europa central gracias a que las personas a diario se preocupan más por su salud y por lo que comen. en 2014 estados unidos importó un valor de US\$ 452.147.000, seguido de Alemania y Francia en jugos concentrados. Los principales productores de estos jugos son España e Italia con cerca de US\$63.500.000 y US\$ 61.000.000 en donde se trabaja con tecnología de punta en los procesos de concentrado generando una utilidad más grande que solo vendiendo la fruta fresca.

En Colombia en lo corrido del año 2014 se exportaron US\$324.590,7 en jugos cítricos concentrados, siendo esta una cifra bastante baja generando la oportunidad de explorar más acerca de productos concentrados que tiene una alta demanda a nivel mundial.<sup>2</sup>

---

<sup>1</sup> ARIAS VARGAS, Nohora Marlen. Uso De Un Juego De Rol Como Herramienta De Motivación En La Enseñanza De La Química; Universidad Nacional de Colombia, 2012. p. 11-15

<sup>2</sup> PROCOLOMBIA. Guía De Oportunidades Comerciales Para El Sector Cítrico Oficina Regional De Medellín. Colombia: 2014. p. 14-18



# 1. GENERALIDADES

## 1.1 LA EVAPORACIÓN

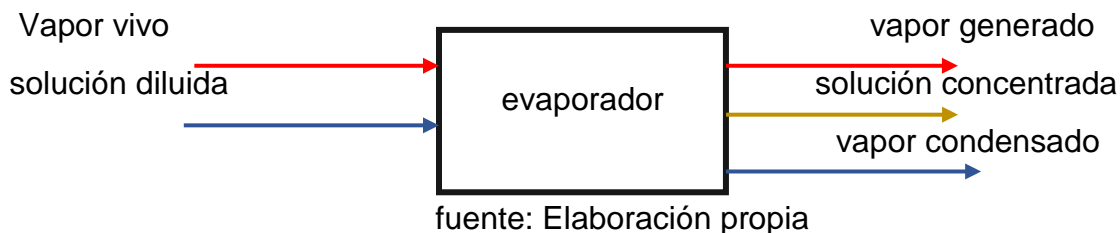
La evaporación es una operación unitaria que consiste en añadir calor a una solución compuesta por un soluto no volátil y un disolvente volátil que generalmente es agua con el fin de remover parcial o totalmente el contenido de la misma presente en la solución por medio de la ebullición, logrando así un aumento en la cantidad de sólidos presentes en la solución<sup>3</sup>

La evaporación es altamente aplicable a industrias como la azucarera, lácteos alimentos, plantas de producción de cloruro de sodio, hidróxido de sodio gomas entre otros. Para el caso de la industria cuyo fin es la concentración de jugos, la evaporación cobra un papel muy importante ya que genera productos con mayor vida en el anaquel y además reduce el volumen de almacenaje lo que desencadena en una disminución en el costo del transporte y así poder generar mayores dividendos para el producto<sup>3</sup>. El panorama para los demás usos industriales es similar, ya que al concentrar una solución se reduce el contenido de agua presente en la misma y, por ende, tanto el volumen como el peso de producto terminado disminuyen, haciendo que el costo del transporte baje, lo cual repercute directamente en la utilidad que este genera.

Esta operación unitaria se puede realizar de dos diferentes maneras; la primera en la que el vapor entra en contacto directo con el fluido a evaporar, gracias a este fenómeno es denominada evaporación directa. En el caso de la evaporación indirecta el vapor circula por un conducto, el cual no permite que ambos fluidos entren en contacto directo.

En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques en el cual se ejemplifica un sistema de evaporación directa.

*Figura 1. Diagrama de bloques evaporación.*



<sup>3</sup> BARBOSA CÁNOVAS, G. y VEGA MERCADO, H. Deshidratación De Alimentos. Zaragoza, España: Acribia Editorial, 2000. p. 2979788420009186

En el caso de la evaporación indirecta el vapor vivo no es un fluido de proceso, este actúa como fluido de servicio. Se observa que ingresan dos corrientes al diagrama de bloques que son el vapor vivo y la solución que será concentrada, estos ingresan a la operación unitaria en donde se produce la remoción parcial o total del solvente presente en la solución a concentrar, es así como emergen tres corrientes, la primera el vapor generado que corresponde al solvente presente en la solución a concentrar por otro lado sale la solución concentrada que es el producto de interés y por último, el vapor condensado producto de la transferencia de calor del vapor a la solución a concentrar.

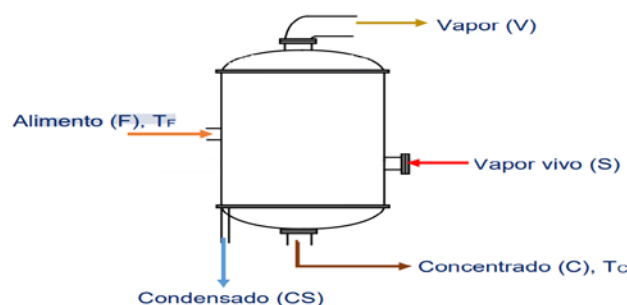
## 1.2 EVAPORADOR

Un evaporador es un intercambiador de calor en el que se produce un cambio de fase en ambas secciones, los tubos y la coraza, con el fin de remover el componente más volátil de la solución problema.<sup>4</sup>

Los equipos de evaporación constan de tres componentes básicos los cuales son:

- Intercambiador de calor: el cual provee la energía necesaria para que el componente más volátil presente en la solución problema cambie de fase a vapor. En la industria generalmente se usa vapor vivo como medio de calentamiento, el cual proviene de una caldera.
- Separador: su función es separar la fase líquida concentrada del vapor producido por el intercambio térmico producido en el intercambiador de calor.
- Condensador: cuya función radica en condensar el vapor y eliminar el condensado del sistema.

*Figura 2. Evaporador*



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. ()*. Bogotá

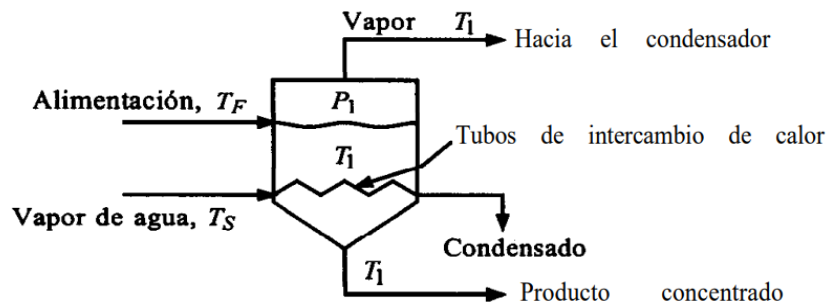
<sup>4</sup> PADILLA, Brenda. Diseño De Un Evaporador Tipo Marmita Con Agitador Y Serpentin Interno Para La Elaboración De Diversos Alimentos En Planta Piloto. Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013. p. 1-79

### 1.3 TIPO DE OPERACIÓN POR EFECTOS

Se entiende por efectos al número de evaporadores presentes en el proceso de evaporación, los cuales hacen que el vapor generado en cada efecto producto de la remoción de agua en cada evaporador sea aprovechada como fuente de energía para evaporar más material volátil en el siguiente evaporador. A continuación, se presentan los diferentes ejemplos.

#### 1.3.1 Efecto simple.

*Figura 3. Diagrama de evaporador de simple efecto.*



Fuente: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p.

Consiste en un único evaporador en el que se alimenta vapor vivo proveniente de una caldera de vapor y la solución que se va a concentrar; generalmente fría, aunque puede sufrir un proceso de precalentamiento para disminuir el uso y por ende el costo de producir vapor vivo.<sup>5</sup>

En este proceso, el vapor que se produce una vez el solvente volátil cambia de fase no es aprovechado, y por ende se hace costoso el proceso ya que se necesitará aproximadamente 1 kg de vapor vivo para evaporar 1 kg de solvente presente en la solución a concentrar sin aprovechar la energía que este puede ofrecer.<sup>3</sup>

Para minimizar el gasto excesivo de vapor vivo el cual condiciona en muchos casos la economía del proceso como en el caso de desalinización de agua, no solo por el material de construcción del evaporador si no por la cantidad de energía necesaria para el proceso<sup>6</sup>, se utiliza un sistema de termocompresión que consiste en un dispositivo que permite reutilizar el vapor producido producto del cambio de fase del solvente presente en la solución problema con el vapor vivo producido en la caldera, "el cual, pierde un poco de su presión, pero gana en flujo másico, obteniendo así

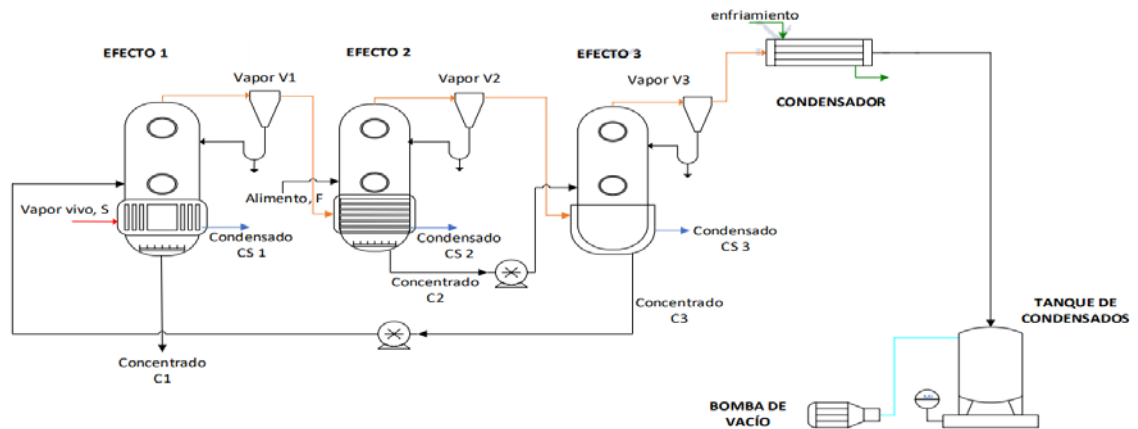
<sup>5</sup> FRANCO, Alberto. DISEÑO DE UN SIMULADOR POR COMPUTADORA DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN EN UNA LÍNEA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO; Universidad de San Carlos de Guatemala, 2006. p. 1-80 (20)

<sup>6</sup> SEMIAT, Raphael. Desalination education capacity in Israel. En: DESALINATION. vol. 141, no. 2, p. 191-198 (197-198)

mejores rendimientos o alguna economía de vapor, no obstante, la economía de vapor aumenta, si se utiliza un sistema de efecto múltiple”<sup>5</sup>

### 1.3.2 Efecto múltiple con alimentación mixta.

Figura 4. Efecto múltiple con alimentación mixta



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE.* (). Bogotá

Consiste por lo menos dos evaporadores interconectados en serie de tal forma que únicamente al primer evaporador ingresa vapor vivo proveniente de una caldera. Gracias al arreglo múltiple el vapor producido por el intercambio de calor entre el vapor vivo y la solución a concentrar es inyectado al siguiente evaporador o efecto; este proceso se repite tantas veces como efectos hayan conectados hasta que el vapor que se produce en el último efecto sea condensado o posiblemente sea utilizado para precalentar los fluidos que ingresarán a los evaporadores.

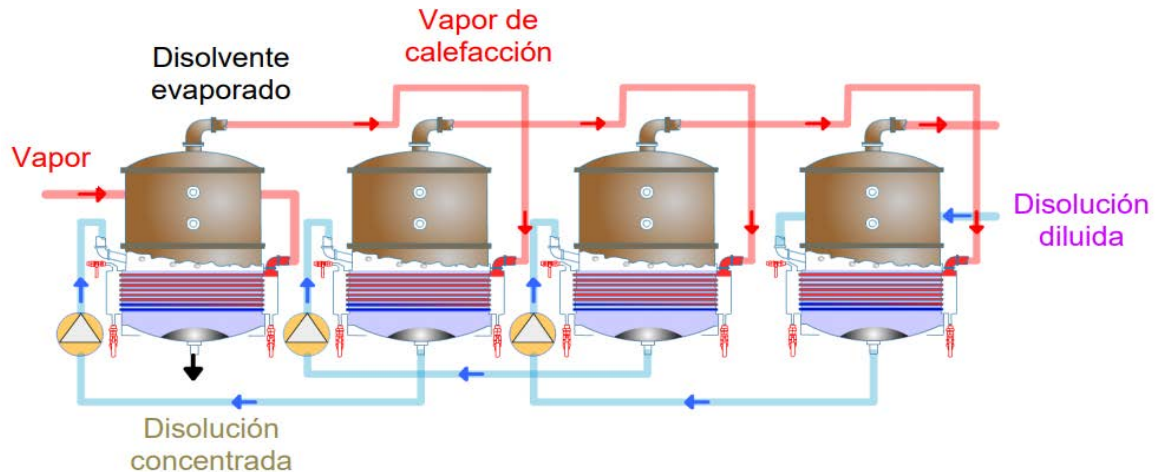
Producto de la condensación del vapor en cada efecto se produce una disminución de la presión, debido a la diferencia de volúmenes específicos del vapor y del líquido aumenta al haber mayor cantidad de vapor presente en la mezcla.

Así mismo, la energía del vapor producido en el primer efecto, es suficiente para evaporar un equivalente en peso en el siguiente efecto, puesto que la energía que posee es la energía de vaporización a una presión mayor. Por lo tanto, por cada efecto en una línea de evaporadores, se tendrá un kilogramo por kilogramo de vapor vivo proveniente de la caldera. De modo que, por cada kilogramo de vapor vivo de la caldera, se obtiene aproximadamente  $n$  kilogramos de vapor producto de la evaporación del componente más volátil presente en la solución a concentrar, donde  $n$  representa el número de efecto, lo que se traduce en una disminución de los costos de operación, no obstante, el costo fijo del equipo y de la instalación aumentarán<sup>5</sup>.

El tren de evaporación es aplicado a industrias como en la concentración de jugos entre otros<sup>78</sup>

### 1.3.3 Efecto múltiple con alimentación en retroceso.

Figura 5. Efecto múltiple con alimentación en retroceso



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

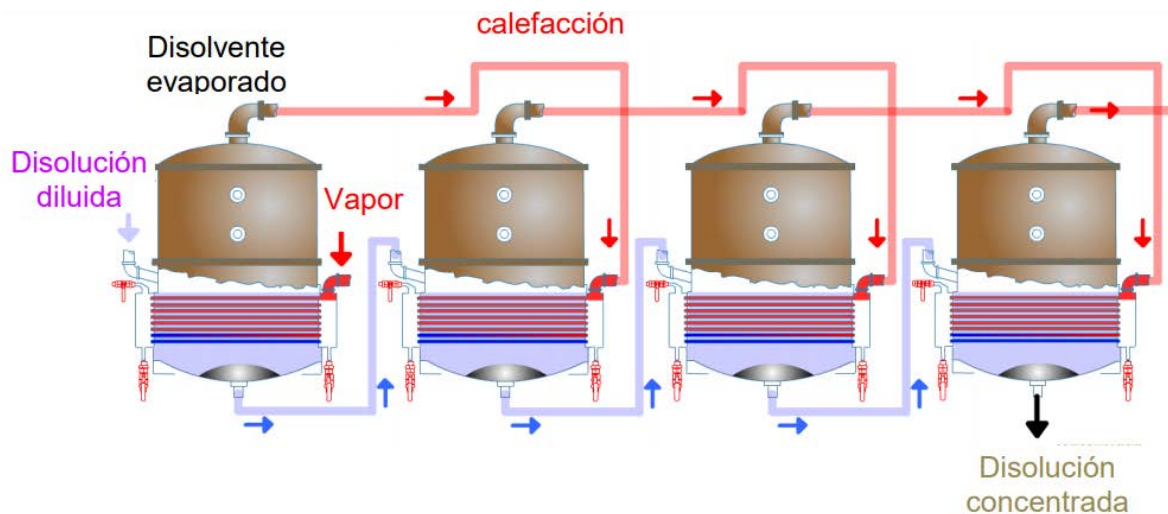
Este arreglo difiere del anterior en que el vapor vivo es alimentado al último efecto, de tal modo que la mayor presión estará en el último efecto. Al utilizar este tipo de arreglo se debe instalar un equipo de bombeo, el cual impulse el fluido al siguiente efecto, lo que hace que este método sea menos utilizado en la industria, sin embargo, es comúnmente usado en industrias donde se manejan fluidos muy viscosos como en la industria panelera logrando que el poder de calentamiento mayor se encuentre en el último efecto donde la concentración e inherentemente la viscosidad sean mayores.

<sup>7</sup> AVALO, Belkis; PÉREZ, Sergio y TOVAR, Marcos. CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DEL PROCESO DE CONCENTRACIÓN DEL JUGO NATURAL DE NARANJA EN UN EVAPORADOR DE TRES EFECTOS. En: Inteciencia. Nov., vol. 34, no. 11, p. 784-790

<sup>8</sup> NÚÑEZ, Álvaro; TARIFA, Enrique y FARFÁN, Norma. SIMULACIÓN ESTACIONARIA DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO PARA JUGO DE TOMATE. En: Avances En Ciencias E Ingeniería. Jan 1, vol. 3, no. 4, p. 1-9

### 1.3.4 Efecto múltiple con alimentación en paralelo.

Figura 6. Efecto múltiple con alimentación en paralelo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

La alimentación en paralelo es un proceso en donde continuamente se está removiendo el producto condensado de cada evaporador. Industrialmente es utilizado en procesos en donde la alimentación se encuentra en estado de saturación y se desea un cambio de concentración pequeño o la cristalización de un sólido presente, como lo es en el caso de la concentración de salmueras o también en procesos en donde se necesitan diferentes concentraciones de un mismo producto<sup>5</sup>.

### 1.4 TIPO DE CIRCULACIÓN

Existen dos tipos de circulación, natural y forzada; la primera, en la que por diferencia de presión y ayudados por la gravedad, el fluido pasa de un efecto a otro sin la necesidad de hacer uso de equipos que impulsen el mismo, tal es el caso de la concentración de leche expuesto por Morison<sup>9</sup> en donde se ve la necesidad de hacer pasar de manera rápida la leche por un evaporador de película descendente ya que al aumentar el tiempo de contacto entre la fuente de calor y la corriente de leche, que puede producir una disminución de 1,3% la cantidad de sólidos presentes en la misma.

Para el caso de la circulación forzada, se hace uso de un equipo de bombeo para garantizar que el fluido circule de manera uniforme por el evaporador.

<sup>9</sup> MORISON, Ken R. Reduction of fouling in falling-film evaporators by design. En: Food and Bioproducts Processing. Jan. vol. 93, p. 211-216

Comúnmente se hace uso de este tipo de circulación cuando el fluido se torna cada vez más viscoso como lo expuesto por Heluane <sup>10</sup> en donde hacen alusión al uso de evaporadores en la industria azucarera, resaltando que al tratarse de un fluido que adquiere una gran viscosidad al concentrarse se debe hacer uso de bombas, además de realizar 2 paradas semanales para realizar limpieza y evitar la formación de incrustaciones que causan una disminución en la eficiencia del equipo.

## 1.5 FACTORES QUE AFECTAN A LA VELOCIDAD DE EVAPORACIÓN

La velocidad de evaporación es el tiempo que transcurre al realizarse la transferencia de calor al fluido a concentrar y de igual manera a la transferencia de materia desde el alimento hacia la corriente de vapor.

Existen diferentes factores que influyen sobre la velocidad de evaporación como lo son<sup>4</sup>

- Diferencia de temperatura entre la fuente de energía y el líquido en ebullición.
- Área de transferencia de calor.
- Película superficial.
- Coeficiente global de transferencia de calor.
- Resistencia a la transferencia de calor.

1.5.1 Diferencia de temperaturas. El fluido a concentrar aumenta su viscosidad con respecto al tiempo debido a que se está removiendo el contenido de solvente volátil presente en la mezcla quedando así el sólido no volátil presente en la solución ocasionando un aumento en el punto de ebullición de la mezcla y por ende la diferencia de temperatura entre el líquido a evaporar y la fuente de calefacción disminuye, haciendo que la velocidad de evaporación disminuya.

Con el fin de garantizar que la diferencia de temperaturas se mantenga de forma constante, generalmente se hace uso de elementos que permitan operar a vacío haciendo que el punto de ebullición de la mezcla a evaporar descienda.

Por otra parte, se hace uso de las diferentes configuraciones a las cuales puede operar el equipo, como lo es alimentar en paralelo, mixto o en contra corriente con el fin de hacer más grade esta diferencia de temperaturas.

1.5.2 Área de transferencia de calor. Está directamente relacionada con el coeficiente global de transferencia de calor en el cual se tiene en cuenta todas las resistencias que se presentan a la hora de realizar el intercambio térmico dentro de las que se destacan la formación de incrustaciones producidas por la falta de

---

<sup>10</sup> HELUANE, Humberto, et al. PLANTEAMIENTO OPERATIVO DE REDES DE EVAPORACIÓN. En: Iberoamerican Journal of Industrial Engineering. vol. 5, no. 9, p. 358-375

limpieza de los equipos y el mal uso que se le da a los mismos, formando una capa que impide la correcta transferencia de calor.

1.5.3 Resistencia a la transferencia de calor. La resistencia a la transmisión de calor en el evaporador suele ser debida principalmente a la capa superficial del líquido. En muchos alimentos la viscosidad aumenta a medida que progresa su concentración, lo que disminuye la velocidad de transferencia de calor, además de permanecer el alimento más tiempo en contacto con las superficies calefactoras, lo que actúa en detrimento de su calidad.

1.5.4 Coeficiente global de transferencia de calor (U). Las propiedades físicas de los fluidos (vapor de calentamiento y el alimento), la conductividad térmica del material del intercambiador de calor, las paredes del evaporador y el régimen del flujo (espesor capa convectiva) afectan la velocidad de evaporación.

## 1.6 EQUIPOS AUXILIARES DEL EVAPORADOR

Ya que los sistemas generalmente operan a presión inferior a la atmosférica, es preciso utilizar condensadores de vapor, bombas de vacío o inyectores entre otros equipos.

1.6.1 Condensadores. Los condensadores de superficie son dispositivos proyectados esencialmente para condensar vapor bajo vacío y se emplean en el último efecto del tren de evaporación ya que el vapor que emerge del efecto no será utilizado para calentar otro efecto.

1.6.2 Bombas de vacío: Para evacuar los evaporadores se usan bombas de desplazamiento positivo e inyectores de chorro de vapor.” en el inyector de chorro se hace pasar a través de una boquilla vapor a alta presión, que penetra en una cámara en que arrastra al vapor de agua y a los gases presentes. es importante tener en consideración que equipo de vacío es responsable de la eliminación del sistema de los gases no condensables. no es responsable en cambio del mantenimiento de la temperatura de ebullición deseada, función que corresponde al condensador”<sup>11</sup>

## 1.7 CAPACIDAD DE UN EVAPORADOR

La velocidad de transmisión de calor  $q$  que sucede en la superficie de calefacción de un evaporador está dada por el producto entre el área de transferencia de calor,

---

<sup>11</sup>PANANA,Alberto. DISEÑO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO, CONECTADOS EN SERIE; Callao, Perú: 2013.



el coeficiente global de transferencia de calor  $U$  y la diferencia de temperatura entre la entrada y salida de la corriente que intercambiará calor.<sup>4</sup>

*Ecuación 1 velocidad de transferencia de calor*

$$q = UA\Delta T$$

Fuente: PANANA, Alberto. DISEÑO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO, CONECTADOS EN SERIE; Callao, Perú: 2013.

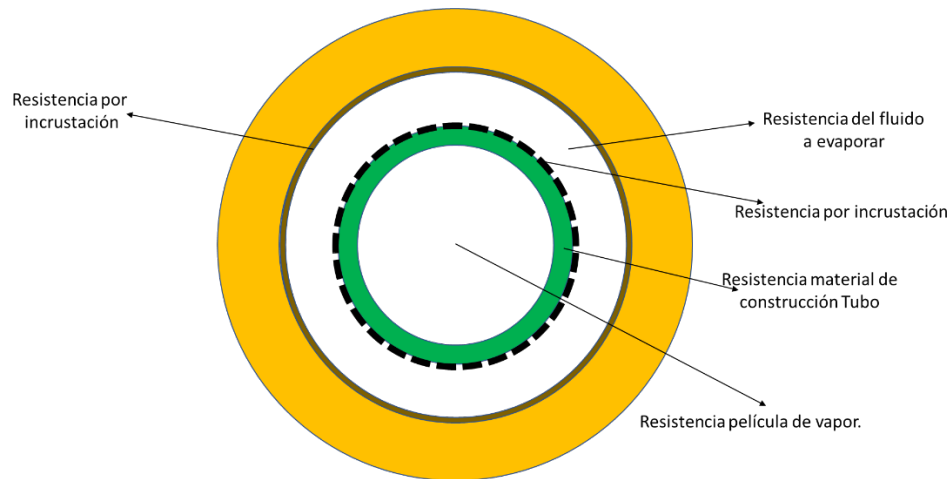
La capacidad de un evaporador depende del estado en que se encuentre la alimentación, así pues, si ésta se encuentra a la temperatura que corresponde a la ebullición de fluido a la presión del sistema, todo el calor que esta posee estará disponible para realizar la evaporación y por ende la capacidad será proporcional a  $q$ ; si dicha alimentación se encuentra fría, es decir por debajo del punto de ebullición, la energía que debe ser suministrada para llegar a la ebullición hará que la capacidad disminuya ya que parte de la energía no se está utilizando para el proceso de evaporación.

Por otro lado, si la alimentación se encuentra a una temperatura superior a la de ebullición, una parte de ella se evaporará espontáneamente y por ende la capacidad será muy superior, a este fenómeno se le denota como evaporación flash.

## 1.8 COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR

La resistencia global a la transmisión de calor entre el vapor de agua y el líquido en ebullición es la suma de cinco resistencias individuales: la resistencia de la película de vapor, las dos resistencias de las costras, interior y exterior de los tubos; la resistencia de la pared del tubo; y la resistencia del líquido en ebullición.<sup>4</sup> en la siguiente figura se puede apreciar el esquema en el cual se muestran las diferentes resistencias.

figura 7 resistencias presentes en la evaporación.



Fuente: elaboración propia

Comúnmente la resistencia por formación de costras del lado de vapor y la resistencia dada por la pared de tubo tienden a cero por lo que en el cálculo se desprecian.

1.8.1 Coeficientes de película de vapor. Cuando un vapor puro saturado entra en contacto con una superficie fría tal como un tubo, se condensa y puede formar gotas en la superficie del tubo, estas se desprenden del tubo haciendo que se forme un camino por el cual más gotas pueden condensarse, al suceder esto se formará una película la cual ejercerá una resistencia a la transferencia de calor.

1.8.2 Coeficientes de líquido. Este depende en gran medida de la velocidad del líquido sobre la superficie que proporcionara el calor para evaporarla.<sup>4</sup>

Este coeficiente generalmente es mayor en los sistemas de circulación forzada que en los que trabajan con la natural; este coeficiente controla la velocidad global de transferencia de calor hacia el líquido en ebullición y es aún más el gobierno que este ejerce sobre soluciones altamente viscosas.<sup>11</sup>

1.8.3 Coeficientes globales. debido a la dificultad de calcular los coeficientes de manera individual en un evaporador, generalmente se hace uso de coeficientes globales, los cuales están basados en la caída neta de temperatura corregida para tener en cuenta la elevación del punto de ebullición<sup>4</sup>.

Este coeficiente va estar gobernado por alguno de los coeficientes mencionados anteriormente y por ende el cambio de los demás coeficientes no afectará en gran medida al global.

## 1.9 FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE EVAPORACIÓN

Existen diversos factores que deben ser tenidos en cuenta al momento de realizar el diseño de los evaporadores como lo son las propiedades del líquido que se concentran las cuales se desglosarán a continuación:

1. *La concentración del líquido*; La alimentación juega un papel importante en el diseño de los evaporadores ya que es común encontrar que esta entra al equipo de forma lo suficientemente diluida asemejándose a las propiedades que pueda tener el agua, a medida que el tiempo de residencia en el evaporador aumenta, la solución se concentra y su viscosidad y densidad pueden elevarse de manera notoria hasta que la solución llega al punto de saturación.

2. Producto del aumento de la viscosidad la solución forma una película delgada alrededor de la superficie de transferencia de calor que se traduce en una resistencia conocida como *incrustación* disminuyendo así el coeficiente de transferencia de calor. A dicha película se le denomina fouling y debe ser continuamente removida para garantizar la efectividad del evaporador<sup>12</sup>.

3. *Solubilidad*; al realizar la evaporación del solvente, la concentración de soluto aumenta de tal forma que puede llegar a la sobresaturación, una vez se llega a este punto se presenta la formación de cristales los cuales ocasionan una obstrucción de los tubos por los cuales circula. Para determinar la cantidad de soluto que puede contener cierta cantidad de solvente a una temperatura específica existen las denominadas curvas de solubilidad, las cuales son una herramienta que proporciona información necesaria a la hora de realizar el diseño del evaporador<sup>13</sup>.

4. *Formación de espuma*; durante la evaporación algunas sustancias forman espumas, como lo es el caso de las soluciones causticas; en la industria alimenticia la leche y algunas soluciones que contienen ácidos grasos entre otras. Dicha espuma es arrastrada por el vapor producido y puede llevar consigo una cantidad de sólidos lo cual hace que la operación no sea la óptima.<sup>4</sup>

5. *Sensibilidad térmica de los materiales*; Productos químicos finos, farmacéuticos y alimentos sufren reacciones indeseadas al ser calentadas a temperaturas moderadas durante relativamente tiempos cortos.<sup>3</sup> Tal es el caso expuesto por Forero y Vélez<sup>14</sup> y Avalo<sup>7</sup> en donde los alimentos que son sometidos a concentración por evaporación en la que usan como fuente energética vapor

---

<sup>12</sup> MCCABE, Warren; SMITH, Julian y HARRIOTT, Peter. Operaciones Unitarias En Ingeniería Química; 4 ed. ESPAÑA: McGraw-Hill, 1991. p. 482-520

<sup>13</sup> GEANKOPLIS, C. J. Procesos De Transporte Y Operaciones Unitarias. 3 ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. p. 547-573

<sup>14</sup> FORERO, FREDDY y VELEZ, CARLOS. OPTIMIZACION DE LA CONCENTRACION POR EVAPORACION OSMOTICA DEL JUGO DE MARACUYA (*Passifora edullis*). En: Dyna. Jan 1. vol. 80, no. 179, p. 90-98

sufren reacciones indeseadas de pardeamiento no enzimático, lo que causa un cambio en las propiedades organolépticas como lo son el color, sabor, olor y textura.

6. *Temperatura de ebullición*; La presión de vapor de la mayor parte de las disoluciones acuosas es menor que la del agua a la misma temperatura. Por tanto, para una presión dada, la temperatura de ebullición de las disoluciones es mayor que la del agua pura. Para disoluciones concentradas la elevación del punto de ebullición se obtiene mejor a partir de una regla empírica conocida como regla de Duhring, según la cual la temperatura de ebullición de una determinada disolución es una función lineal de la temperatura de ebullición del agua pura a la misma presión. Por tanto, sí se representa la temperatura de ebullición de la disolución frente a la del agua a la misma presión se obtiene una línea recta<sup>4</sup>.

Tal es el caso del artículo de Hermes<sup>15</sup>, en el que realizan el cálculo del aumento de la temperatura de ebullición utilizando las líneas Duhring para realizar el ajuste en la temperatura de operación del evaporador con el fin de lograr la mayor eficiencia en el evaporador.

7. *Presión*; la presión juega un papel fundamental al momento de operar ya que el punto de ebullición está dado por la presión de vapor del fluido y la presión del sistema, por ende, al operar a bajas presiones las temperaturas de ebullición disminuirán y se requerirá de menor cantidad de energía que debe adquirir el fluido para lograr superar la presión del sistema.

8. *Formación de incrustaciones*; el coeficiente global de transferencia de calor se ve afectado por cada una de las películas que se opongan a la transferencia de calor, una de ellas es la que produce por adhesión a la superficie de calentamiento, que con el tiempo puede llegar a obstaculizar el paso de fluido, es por esto que se recomienda realizar una limpieza profunda con el fin de evitar la formación de dicha película y por ende se necesite mayor cantidad de energía para lograr la evaporación del solvente.

## 1.10 CLASIFICACIÓN EVAPORADORES

Existe una gran variedad de condiciones que deben ser tenidas en cuenta para diseñar el evaporador existen diferentes tipos de evaporadores los cuales se basan en el mismo principio de funcionamiento en el cual el calor es suministrado por condensación de un vapor (generalmente agua) en contacto con una superficie metálica, con el líquido a concentrar del otro lado de dicha superficie.<sup>13</sup>

---

<sup>15</sup> HERMES, A. Rangel Jara y ARGOTI, Andrés. Cálculo numérico de un evaporador químico sobre una hoja electrónica. En: Ingeniería E Investigación. Sep 1, no. 44, p. 48-55

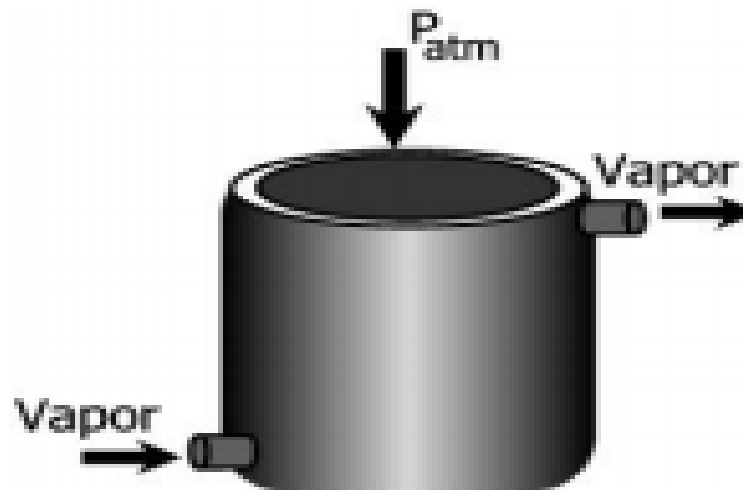
Los evaporadores pueden ser clasificados según el tipo de circulación que tengan en natural y en forzada, siendo la segunda la más costosa ya que se debe suministrar un impulso dado por una bomba a la alimentación.

Dentro de la familia de evaporadores con circulación natural se encuentran<sup>4</sup>

- Marmita abierta
- Tubos horizontales
- Tubos cortos verticales

#### 1.10.1 Marmita abierta.

*Figura 8. Evaporador de marmita abierta*



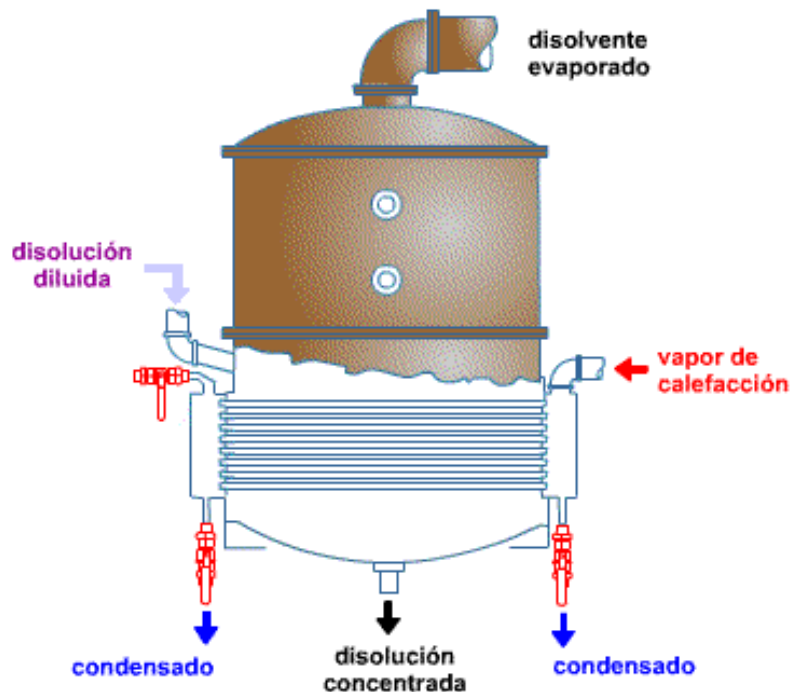
Fuente. Franco, A. (2006). diseño de un simulador por computadora de procesos de evaporación en una línea de evaporadores de múltiple efecto.

El evaporador de marmita abierta consiste en un recipiente abierto que trabaja a presión atmosférica local, con una chaqueta rodeándolo por medio de la cual se hace transferir energía de vapor que condensa sobre la superficie de la marmita.<sup>5</sup>

Existe una variación en el equipo en la cual la alimentación es calentada por medio de serpentines o incluso directamente al fuego, además, se puede hacer uso de paletas o aspas para la agitación constante, produciendo así una mejora en la transferencia de calor.<sup>13</sup>

### 1.10.2 Evaporador de tubos horizontales.

Figura 9. Evaporador de tubos Horizontales



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

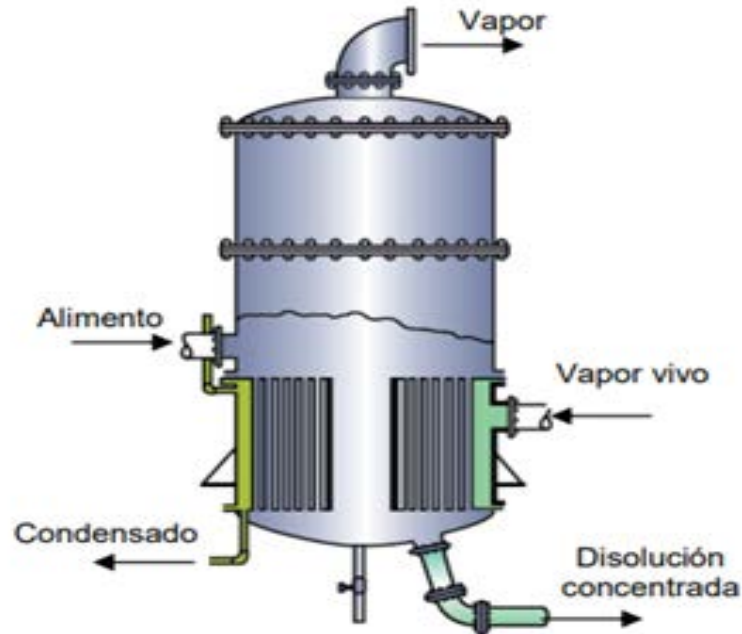
Este es el evaporador continuo, más sencillo que hay, funciona de la misma manera que un intercambiador de calor de coraza y tubos. La forma física del evaporador, es un recipiente, que posee tubos horizontales que entran por un extremo y salen por el otro, por un lado, entra el vapor y por el otro sale el condensado. En la parte exterior de los tubos e interior al recipiente, está el líquido que se desea evaporar<sup>5</sup>. El banco de tubos horizontales dificulta la circulación y en consecuencia los coeficientes globales de transmisión de calor de este tipo de evaporadores son bajos, destinados originalmente a la evaporación de líquidos de escasa viscosidad que no formaban espumas ni costras.<sup>13</sup>

1.10.3 Evaporador vertical de tubos cortos. Es un evaporador de uso común en la industria; la evaporación tiene lugar dentro de los tubos, saliendo por la parte superior el disolvente evaporado y por la parte inferior la disolución concentrada. el vapor calefactor entra por encima del haz de tubos y sale como agua condensada.

Este tipo de evaporador alcanza buenas velocidades de evaporación con líquidos de viscosidad moderada, no corrosivos y poco tendentes a la formación de costra.

Entre sus aplicaciones típicas se hallan la concentración de disoluciones de azúcar de caña, azúcar de remolacha, glucosa, extracto de malta, sal y zumos de frutas.<sup>16</sup>

*Figura 10. Evaporador de tubos verticales*



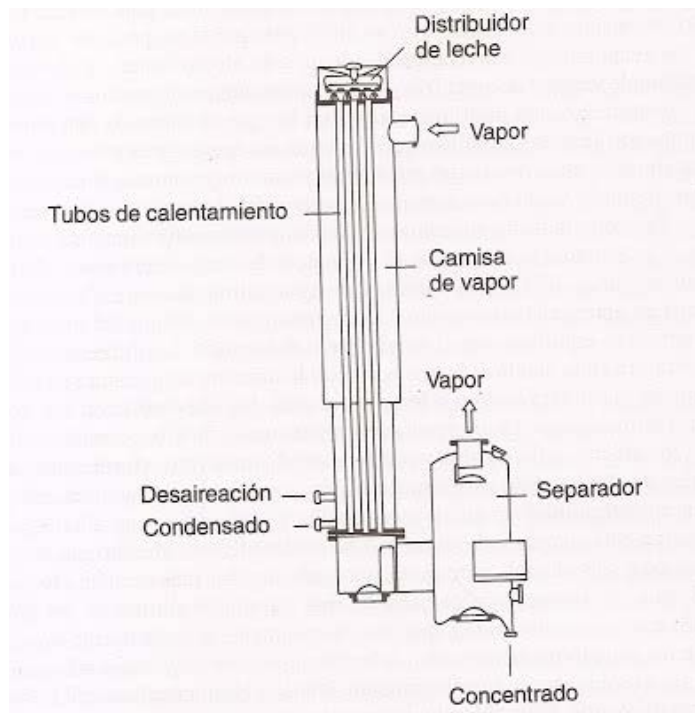
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

1.10.4 Evaporador de película descendente. en el evaporador de película descendente se pueden realizar la concentración de materiales altamente sensibles al calor, tales como el zumo de naranja, requieren un tiempo mínimo de exposición a una superficie caliente. esto puede conseguirse con evaporadores de película descendente de un solo paso, en los que el líquido entra por la parte superior, descende por el interior de los tubos calentados con vapor de agua, y sale por el fondo.<sup>12</sup>

---

<sup>16</sup> BRENNAN, J. C., et al. Las Operaciones De La Ingeniería De Los Alimentos. 3 ed. Zaragoza, España: Acribia S.A., 1998. p. 343-375

Figura 11. Evaporador de película descendente



Fuente. Ing. Industrial, U. D. (2012, junio 25).  
Evaporador de película descendente.

La familia de evaporadores cuya circulación es forzada consta de los siguientes evaporadores.

- Evaporador de película agitada
- Evaporador de circulación forzada
- Evaporador de tubos verticales largos

1.10.5 Evaporador de película agitada. Con el fin de mejorar la transferencia de calor en el evaporador se diseña una modificación al evaporador de película descendente en la cual un solo tubo de diámetro considerable se encuentra instalado en el equipo, dentro del mismo se encuentra un sistema de agitación con aspas las cuales distribuyen y hace que la alimentación entre en régimen turbulento." este tipo de evaporador es práctico para materiales muy viscosos, pues el coeficiente de transferencia de calor es mayor que en los modelos de circulación forzada.

Se usa para materiales viscosos sensibles al calor como látex de caucho, gelatina, antibióticos y jugos de frutas. Sin embargo, tiene costo alto y capacidad baja<sup>13</sup>." Si los fluidos son poco viscosos, se emplean bombas centrífugas y, si lo son más, se emplean bombas de desplazamiento positivo<sup>16</sup>



1.10.6 Evaporador de tubos verticales largos. Este equipo consta de un intercambiador de calor con vapor de agua en el lado de la coraza, la alimentación entra en el evaporador por los tubos en la parte inferior del evaporador de allí recibe el nombre de evaporador de película ascendente. durante una corta distancia la alimentación que entra en los tubos asciende como líquido recibiendo calor desde el vapor de agua.

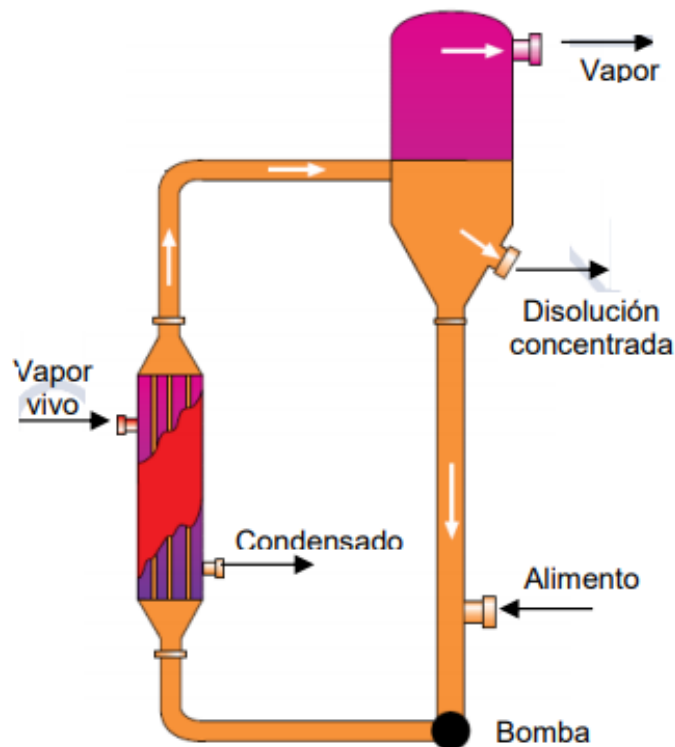
Después se forman burbujas en el líquido al comenzar la ebullición, aumentando la velocidad lineal y la velocidad de transmisión de calor. Cerca de la parte superior de los tubos las burbujas crecen rápidamente. En esta zona las burbujas de vapor alternan con masas de líquido que ascienden rápidamente a través de los tubos y salen a gran velocidad por la parte superior, para evitar la pérdida de líquido se instala un separador en el cual la velocidad con la que viene el vapor disminuya rápidamente y no se escapen residuos líquidos, además posee un sistema de paredes deflectoras en el separador con las cuales la corriente de vapor choca ocasionando que las gotas de líquido caigan y vuelvan a la alimentación.<sup>12</sup>

Al poseer un coeficiente de transferencia de calor mucho más grande en el lado coraza producido por el vapor se hace necesario que la solución pase con mayor velocidad por los tubos con el fin de aprovechar la energía entregada por el fluido.<sup>13</sup> Para garantizar que la velocidad del fluido sea la óptima se hace necesario el uso de una bomba, la cual se encarga de impulsar el fluido a lo largo de los tubos. Los evaporadores de tubos largos verticales son especialmente eficaces para concentrar líquidos que tienden a formar espuma. La espuma se rompe cuando la mezcla de líquido y vapor de alta velocidad choca contra las placas deflectoras.<sup>12</sup>

1.10.7 Evaporador de circulación forzada. “en un evaporador de circulación natural el líquido entra en los tubos con una velocidad de 1 a 4 ft/s. la velocidad final aumenta rápidamente al formarse vapor en los tubos, de forma que generalmente las velocidades de transmisión de calor son satisfactorias. sin embargo, con líquidos viscosos el coeficiente global en una unidad de circulación natural puede ser demasiado bajo desde el punto de vista económico”<sup>12</sup> para aumentar la economía del proceso se hace necesario utilizar una bomba centrífuga la cual impulsa el fluido a través de los tubos a una velocidad promedio de 10 pies/s.

En la coraza se encuentra el vapor, el cual proporciona la energía necesaria para que el fluido se evapore, al igual que en el evaporador de tubos verticales largos este posee una placa defletores con la cual choca el vapor cayendo así las gotas que este lleve.

Figura 12. Evaporador de circulación forzada



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

1.10.8 Evaporador de platos. Este evaporador consta de una serie de placas por las cuales circula el vapor vivo o en su defecto el fluido caliente el cual proporcionara la energía para evaporar el solvente presente en la solución a concentrar. Dicha solución viajara por la coraza haciendo que el área de contacto sea mayor a los evaporadores convencionales. Con el fin de aumentar el área de intercambio del evaporador se han diseñado placas corrugadas.<sup>17</sup> Se pueden utilizar evaporadores de placas espirales en lugar de evaporadores tubulares, y ofrecen una serie de ventajas como lo son: las fuerzas centrífugas mejoran la transferencia de calor; la configuración compacta da como resultado una vía de líquido más corta; son relativamente fáciles de limpiar y resistentes a las incrustaciones; la expansión térmica diferencial es aceptada por la disposición en espiral. Estas unidades de flujo curvo son particularmente útiles para manejar materiales viscosos o fluidos que contienen sólidos.<sup>17</sup>

<sup>17</sup> VOGEL, Henry C. y TODARO, Celeste M. 12.5.8 Plate Evaporators. En: [Anónimo] Fermentation and Biochemical Engineering Handbook - Principles, Process Design, and Equipment (3rd Edition). Elsevier,

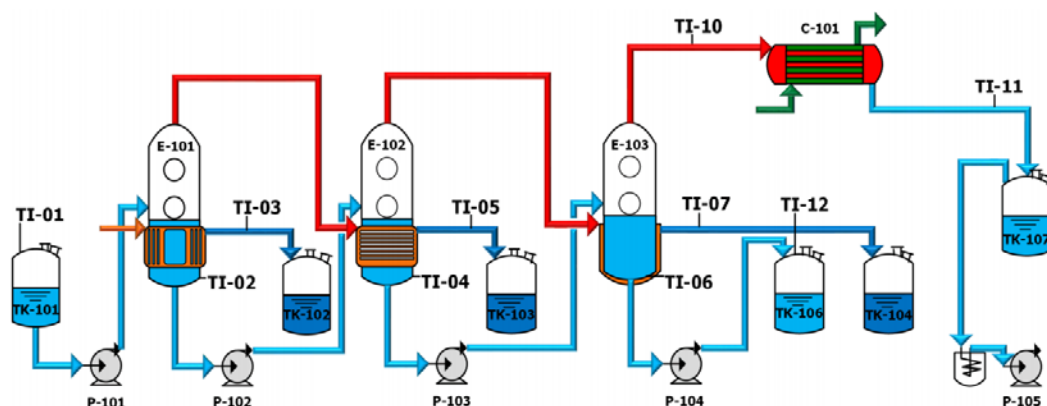
## 2. CARACTERIZACIÓN DEL TREN DE EVAPORACIÓN (CONTROL MANUAL) REF. TE-M

El equipo adquirido por La Fundación Universidad América a la empresa Process Solutions & Equipment PS&E es un tren de evaporación fabricado en acero inoxidable 304 con acabado brillante. El tren de evaporación que puede ser observado en el Anexo M, N y O está diseñado para trabajar en simple o múltiple efecto, con alimentación tanto en paralelo como contracorriente, además con circulación forzada o natural y posee los siguientes componentes:

- Sistema de almacenamiento de alimento a evaporar.
- Tanques de recolección de producto concentrado y condensado.
- Evaporador de chaqueta
- Evaporador de calandria vertical (tubos verticales)
- Evaporador de calandria horizontal (tubos horizontales)
- Evaporador de circulación forzada
- Condensador de vapor
- Tablero de control.

En el anexo A se encuentra una lista de chequeo de los componentes presentes en el tren de evaporación en el que se incluyen válvulas, tanques, bombas, accesorios e instrumentación. En la siguiente imagen se presenta el diagrama del tren de evaporación.

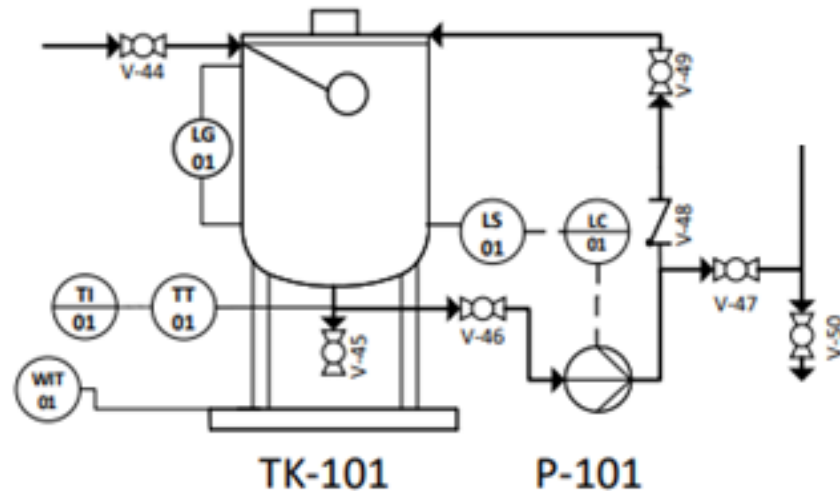
*Figura 13. Tren de evaporación Fundación Universidad de América.*



FUENTE: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. ()*. Bogotá

## 2.1 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ALIMENTO A EVAPORAR

Figura 14. Tanque de alimentación



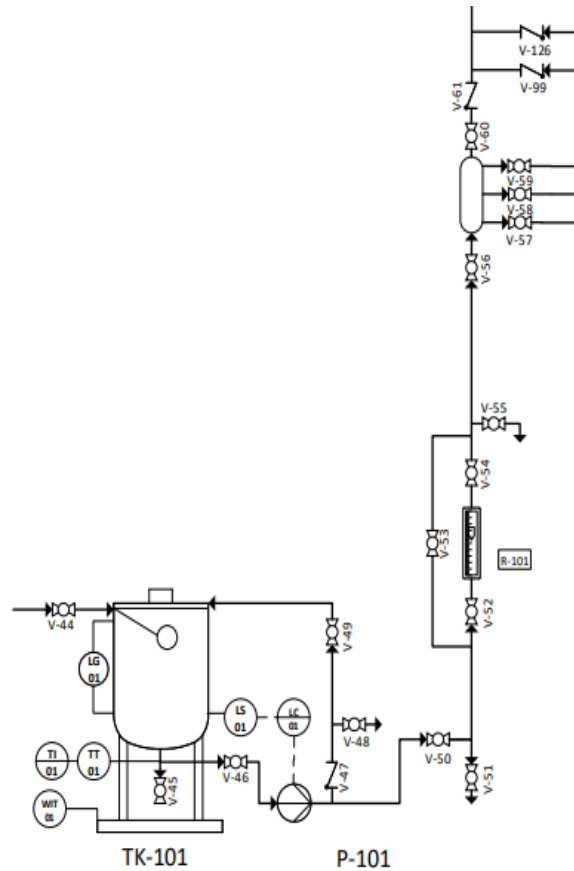
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S.  
manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual)  
REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

El sistema mostrado en la figura de 14 consta de un tanque cilíndrico TK-101 de acero 304 mencionado en la sección 2.1 con una capacidad de 38 litros.

El sistema está provisto de un total de 7 válvulas de bola de las cuales 5 (V-46 a V-50) hacen parte del sistema de bombeo a los evaporadores, la válvula V-49 permite realizar recirculación al tanque de alimentación, la V-47 permite llevar el fluido hasta un manifold que lleva a cada evaporador y por último la V-50 permite realizar una purga; las dos restantes (V-44 y 45) se encuentran situadas en la entrada de alimento y en la parte inferior del tanque con el fin de servir de toma muestras y para realizar el vaciado del mismo, cuenta con un sistema de control de nivel, tanto máximo como mínimo. El primero consta de un flotador y el segundo de un sensor de nivel ambos con el fin de evitar un derrame de fluido o la cavitación de la bomba adicionalmente, cuenta con un indicador de nivel visible” mirilla de vidrio “, un indicador de temperatura tipo J y, por último, cuenta con un sistema de pesaje que permite cuantificar el peso del alimento.

### 2.1.1 Sistema de bombeo.

Figura 15. Sistema de bombeo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT  
PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación  
triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

El sistema de bombeo consta de una bomba centrífuga P-101, la cual impulsa el alimento hasta los evaporadores o puede ejercer el papel de recirculación al tanque de alimento, la temperatura de operación del líquido está en el intervalo de -10 °C hasta 60 °C.

La Lista de chequeo con las especificaciones técnicas se encuentran en el Anexo B, la válvula de cheque V-47 permite el paso del fluido únicamente hacia el tanque y la válvula V-48 permite realizar la purga.

El fluido puede tomar dos vías, la válvula V-53 permite el paso del fluido sin pasar por el medidor de caudal y las válvulas V-52 y 54 llevan el alimento al rotámetro, seguido de la V-55 que sirve como toma muestras o purga del sistema, siguiendo con esta línea se llega a la V-56 que permite la entrada al manifold que consta de 4 válvulas; la V-57 encausa el fluido al intercambiador de calor E-104 para realizar

la evaporación por circulación forzada, la V-58 lo envía al evaporador de chaqueta E-103, la V-59 realiza el mismo proceso enviando el fluido al evaporador de calandria horizontal E-102 y por último, la V-60 lo lleva al evaporador de calandria vertical E-101. La válvula V-61,99 y 126 son válvulas de cheque que impiden que el fluido se devuelva desde el evaporador E-101, el evaporador de calandria horizontal E-102 y el evaporador de chaqueta E-103.

2.1.2 Control de nivel. El tanque de alimento posee un sistema de control de nivel que una vez llega a una consigna de nivel bajo se envía una señal al controlador de nivel que a su vez convierte la señal a una de tipo eléctrico para que la bomba centrifuga se apague. Por otra parte, el control de nivel alto de fluido es realizado por medio de un flotador que una vez el mismo alcanza una altura determinada cierra la válvula que permite el llenado del tanque. Adicionalmente posee una mirilla de vidrio que permite divisar el nivel en el tanque.

2.1.3 Sistema de pesaje. La cuantificación de la masa se realiza por medio de celdas de carga y son identificadas en el tablero de control.

Las celdas de carga son transductores electrónicos cuya finalidad es absorber una deformación y devolverla en una propiedad física como por ejemplo un potencial electrónico. Las más utilizadas en el mercado son las basadas en galgas extensiométricas las cuales convierten la fuerza producto del peso del fluido en señales eléctricas medibles.

Las galgas están unidas a una viga o miembro estructural que se deforma cuando el peso se aplica. En la mayoría de los casos, cuatro galgas se utilizan para obtener la máxima sensibilidad y la compensación de temperatura.

Dos de las galgas suelen estar en tensión, y dos en compresión, y están conectados (mediante cables) con los ajustes de compensación. Cuando se aplica el peso, la tensión cambia la resistencia eléctrica de las galgas en proporción a la carga.<sup>18</sup> En la tabla 1 se encuentran las especificaciones de las balanzas.

*Tabla 1 Especificaciones balanzas*

<b>Variable</b>	<b>Unidades</b>
Capacidad máxima	100000 (g)
Temperatura de operación	40 °C

Fuente. Elaboración propia

En total existen 7 medidores de masa en el tren de evaporación, los cuales están presentes en el anexo C con el fin de realizar su verificación.

<sup>18</sup> BENVENUTO, Nicolas y JULIO, Yair. Mesa Dinamométrica Para Investigación. UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA, 2013. p. 32-34

2.1.4 Termocupla tipo j. También conocido como termopar es un dispositivo capaz proporcionar una medida de temperatura a través de la diferencia de potencial causada por los materiales que lo componen, el principio de funcionamiento está dado por la circulación de una corriente en un circuito cerrado formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a distintas temperaturas.

La circulación de la corriente es explicada a través del efecto Peltier y el efecto Thomson, el primero provoca la liberación o absorción de calor en la unión de los metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión.

El segundo que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente temperaturas.<sup>19</sup>

Los hilos que poseen los termopares están fabricados de diferentes materiales de tal forma que se adapten a las necesidades del cliente y gracias a esto tiene una clasificación establecida.

Particularmente el tipo j es el que está instalado en el taque de alimentación, este posee un hilo de hierro (Fe) y otro de una aleación entre el cobre y el níquel (Ni) denominada constantanio.

El termopar tipo J tiene un rango de funcionamiento entre -200 y 1200°C, pero se debe evitar usar a temperaturas superiores a 550°C causando la oxidación del hierro se acelera, para esto es necesario aumentar el diámetro del hilo.

De acuerdo a la precisión que posea el termopar son clasificados por diferentes clases siendo la clase 1 la más precisa. A continuación, se presenta en la tabla 2 las tolerancias y los rangos de temperatura en los cuales trabaja el termopar tipo j.

*Tabla 2. Características termocupla tipo J*

Termopar	Clase 1	Clase 2	Temperaturas de trabajo
Tipo J Fe/Cu-Ni	±1.5°C -40°C a 750°C	±2.5°C -40°C a 750°C	-200 A 1200°C

Fuente: CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 8 ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. p. 254-257

En el anexo C se presentan los indicadores de temperatura presentes en el tren de evaporación para realizar la validación.

2.1.5 Válvula de cheque. Estas válvulas son de accionamiento automático, funcionan sin controles externos y su funcionamiento únicamente depende de la dirección en la que viaja el fluido. Es también denominada válvula de retención o antirretorno ya que está destinada a impedir una inversión de la circulación. La

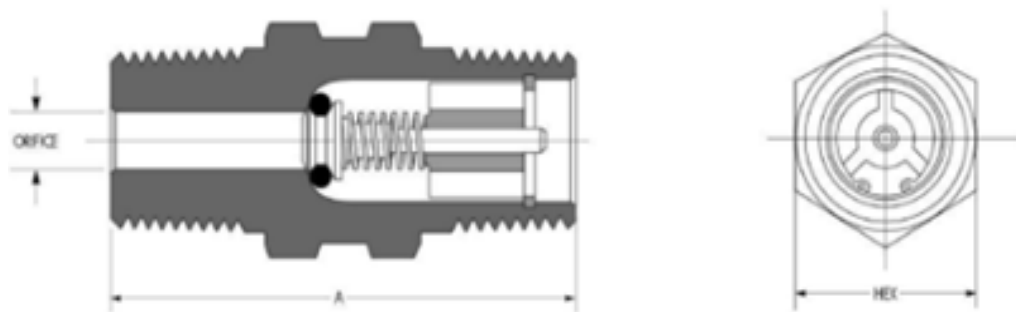
<sup>19</sup> CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 8 ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. p. 254-257

circulación del líquido en la dirección del sentido deseado abre la válvula, al invertirse la circulación, se cierra. Existen tres tipos generales de válvulas, de retención de columpio, de elevación y de mariposa. La primera posee un disco abisagrado que se abre completamente con la presión del fluido y se cierra cuando la presión se interrumpe o hay circulación inversa; la segunda en la que un elemento como una esfera o un disco es elevado gracias a la presión que es ejercida a por el fluido; por último la tercera posee un sistema de doble puerta abisagrado asimilándose a las alas de una mariposa, haciendo que se abran las alas cuando el fluido lleva la dirección correcta y cerrando las alas al ir en sentido contrario.<sup>20</sup>

Particularmente las válvulas instaladas en el tren de evaporación son de tipo vertical también conocida como in line check, la cual posee un resorte que regula el paso de fluido en una sola dirección, al haber presión del lado contrario, el resorte vuelve a su posición de origen impidiendo el paso de fluido.

En la figura 5 se pueden apreciar sus componentes internos y en el anexo L se presentan las válvulas de cheque que se encuentran instaladas en el tren de evaporación.

*Figura 16. Componentes de válvula check*



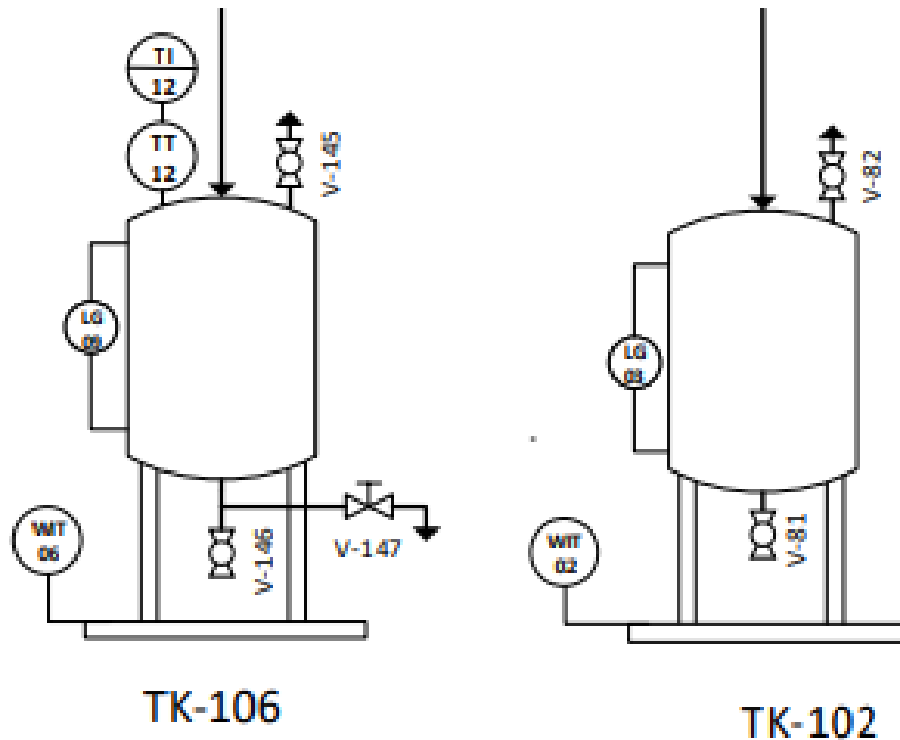
Fuente: Corredor, E. (2018). Información tren de evaporadores. (). Bogotá, Colombia.

<sup>20</sup> Grupo Compás. Válvulas de retención o de antirretorno. [Consultado el sep 25 ,2018]. Disponible en: <http://valvula.es/Tipos-de-valvulas/Valvulas-de-retencion.php>



## 2.2 TANQUES DE RECOLECCIÓN DE PRODUCTO CONCENTRADO Y CONDENSADO

Figura 17. Tanque de producto y condensado



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Existen un total de 5 tanques de condensados (TK-102,103,104,105 y 107) como el mostrado en la parte derecha de la figura 5, estos condensados se producen gracias al intercambio de calor entre el vapor vivo y la solución a evaporar, están fabricados en acero 304 descrito en la sección 2.1 con una capacidad de 32 l, posee dos válvulas de bola, una (V-81,103,130,139 y 39 respectivamente) de ½" para realizar el descargue del producto y otra (V-82,104,131,140 y 38 respectivamente) de ¼" para realizar alivio atmosférico, además de poseer una mirilla de vidrio cuya función es indicar el nivel.

En la parte superior se ubica una tapa flanchada removible con empaque y tornillos en acero inoxidable, sobre esta tapa se encuentran instalados una línea de entrada una válvula de bola para realizar alivio atmosférico y una conexión para termocupla y todo el sistema cuenta con un sistema de pesaje.

El tanque de producto TK-106 se asemeja a las características que posee el tanque de condensado, a diferencia que posee una toma muestras V-147 y termocupla tipo J y tiene una capacidad de 30 litros.

2.2.1 Válvulas de bola. Las válvulas que el sistema posee son de ½” y ¼”, son llamadas de esta manera debido a que tiene una cavidad interna de forma esférica en la cual se encuentra ubicado el obturador en forma de bola. El obturador posee una abertura usualmente en V que permite el paso del fluido cuando la válvula se encuentra abierta, en posición de abertura total, la válvula equivale aproximadamente al 75% del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el manejo de fluidos negros, o bien en fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión ya que no se encuentra diseñada para realizar control de caudal.<sup>19</sup>

En el anexo H se muestran la totalidad de las válvulas instaladas en el tren de evaporación.

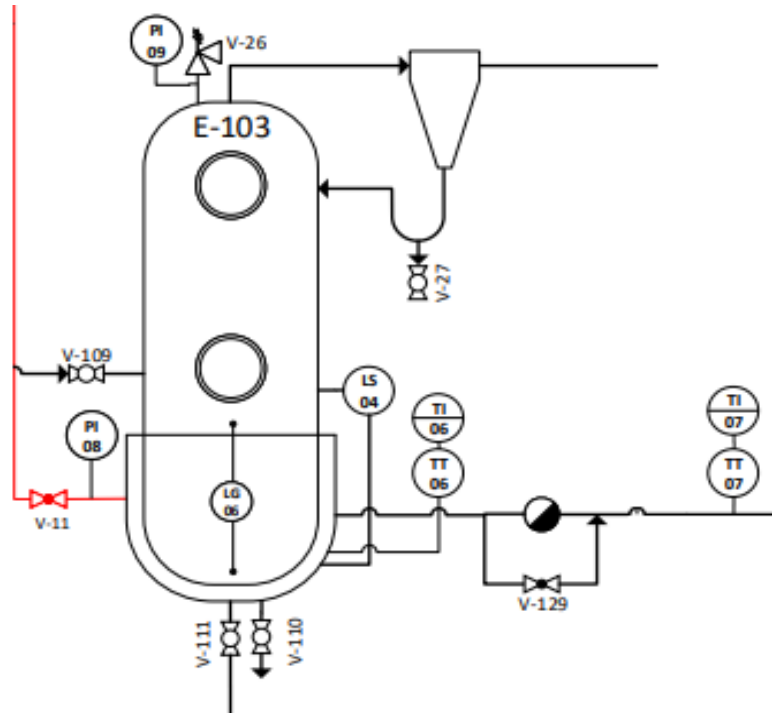
2.2.2 Mirilla de vidrio. Este es un dispositivo que consiste en un tubo de vidrio instalado de forma vertical, el cual utiliza el principio de vasos comunicantes para indicar la altura de un producto<sup>21</sup>.

---

<sup>21</sup> Vapasa. INDICADORES DE NIVEL – Vapasa. vapasa.com. 2018.

## 2.3 EVAPORADOR DE CHAQUETA

Figura 18. Evaporador de chaqueta



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Este equipo está constituido por dos secciones, la sección enchaquetada y la cámara de separación ambas del material descrito en la sección 2.1 y cada una con un diámetro total de 0.25 metros. La sección enchaquetada utiliza vapor como fluido de calentamiento y posee una capacidad de 17 litros para realizar la transferencia de calor al alimento y producir la evaporación.

Esta línea posee un indicador de presión tipo tubo Bourdon; dentro de la sección de intercambio de calor se encuentra instalado un indicador de nivel el cual envía la señal a una bomba dosificadora para aumentar o disminuir la cantidad de fluido que se encuentra en dicha sección.

Una vez sucede la transferencia de calor, el vapor pasa a la cámara de separación de 1 metro de altura que cuenta con sensores de presión tipo Bourdon y de temperatura tipo j. El equipo cuenta con una válvula de seguridad la cual realiza alivio atmosférico cuando el equipo se encuentra fuera del rango permitido.

En la parte de cimbras se encuentra ubicado un ciclón aislado con fibra de vidrio que tiene como función retornar al evaporador todas las gotas que puedan precipitar en las cimbras, además posee una válvula de bola que permite eliminar el contenido de agua emergente del ciclón.

Por otra parte, en la sección de fondos, se cuenta con un indicador de temperatura y una trampa de vapor que permite que todo el fluido que entrará al siguiente efecto sea líquido y mediante una válvula de globo todo el condensado pueda retornar tanque de colección.

El producto concentrado emerge por la parte inferior del evaporador por medio de dos formas, la primera en la que por medio de una válvula de bola se lleva aún sistema de bombeo que lleva el producto al tanque de recolección o como alimento al siguiente evaporador y el segundo en que por medio de otra válvula de bola se realiza el vaciado del evaporador.

La válvula V-109 es la que permite la entrada de alimento al evaporador de chaqueta, la V-111 envía el producto a la bomba dosificadora y posteriormente al manifold que conduce el producto a los demás evaporadores o al tanque de producto, la V-110 permite realizar el vaciado del evaporador, la línea donde se encuentra ubicada la trampa de vapor envía el vapor vivo condensado a su respectivo tanque T-104, la válvula V-27 permite realizar la purga a las gotas que se condensan en el ciclón, y por último la válvula V-129 funciona de bypass para omitir la trampa de vapor.

2.3.1 Sensor de presión. El sensor instalado en el evaporador de chaqueta es un tipo Bourdon, el cual consta un tubo doblado en circunferencia con un extremo fijo a la entrada de la presión que al aumentarla dicho tubo tiende a enderezarse y el movimiento es transmitido a una aguja indicadora<sup>19</sup>.

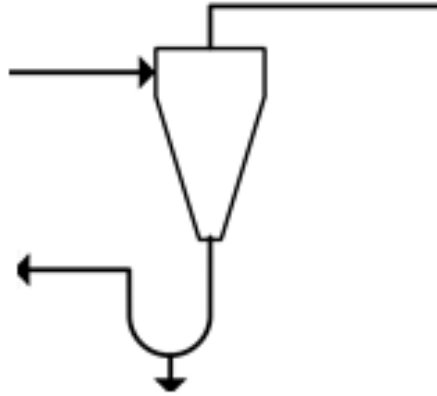
Este movimiento es proporcional a la diferencia de presiones que hay entre el interior y el exterior del tubo.<sup>22</sup> En el anexo C se presentes los indicadores de presión presentes en el tren de evaporación.

---

<sup>22</sup> Metas & Metrólogos asociados. El Manómetro Bourdon. La Guía Metas. Zapotlán El Grande, Jalisco, México. p. 1-5

### 2.3.2 Ciclón

Figura 19. Ciclón



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Es un equipo usado para la remoción de material particulado presente en una corriente gaseosa cuyo principio de funcionamiento es la impactación inercial generada por la fuerza centrífuga la cual hace que las partículas de mayor tamaño se desplacen hacia las paredes del ciclón y puedan caer por el fondo del equipo.<sup>23</sup>

El vapor cargado de sólidos entra tangencialmente por la parte superior cilíndrica. La corriente de vapor sigue una trayectoria en espiral que primero se dirige hacia el fondo del tronco de cono, ascendiendo después por el centro del mismo. El vapor, una vez depurado, abandona el ciclón por la parte superior y las partículas separadas se descargan por el fondo del ciclón.<sup>24</sup>

2.3.3 Electroválvula. Este es un dispositivo encargado de regular el flujo de fluido a través de la tubería. Consiste en dos partes principalmente, el solenoide y la válvula. El primero es una bobina la cual recibe la señal proveniente de indicador de nivel la cual es de tipo eléctrico y la transforma en energía mecánica para accionar la válvula. “Para una máxima seguridad, la válvula de solenoide está continuamente excitada; de este modo, si falla la corriente, la válvula de control pasa a la posición de seguridad.”<sup>19</sup>

<sup>23</sup> ECHEVERRI LONDOÑO, Carlos Alberto. Diseño óptimo de ciclones. En: Revista Ingenierías Universidad De Medellín. vol. 5, no. 9, p. 123-139

<sup>24</sup> Innova Ingeniería. Ciclones. [Consultado el Jul 10,2018]. Disponible en: <http://innova-ing.com/2017/10/11/ciclones/>

2.3.4 Válvula de alivio. Se puede definir como un dispositivo que automáticamente sin otra asistencia de energía que la del propio fluido implicado, descarga fluido para evitar que se exceda una presión predeterminada y que está diseñada para que vuelva a cerrar y se evite el flujo adicional de fluido después de haberse restablecido las condiciones normales de presión.<sup>25</sup>

Las válvulas de alivio instaladas en el tren de evaporación están calibradas a una presión máxima de 90 psi, su presión es ajustable desde 10 hasta 225 psig y la temperatura de operación es de -40 hasta 148°C en el anexo G se encuentra la ficha de seguridad suministrada por el fabricante. En el anexo I se muestran la totalidad de las válvulas instaladas en el tren de evaporación.

2.3.5 Trampa de vapor. Este es un dispositivo que permite remover: condensado aire y gases no condensables. Existen diferentes tipos de trampas, las más comunes son las de tipo mecánico las cuales trabajan bajo el principio de la gravedad permitiendo la apertura o cierre de una válvula debido al movimiento de un flotador. La trampa de vapor de tipo termodinámica es la que se encuentra en el tren de evaporación y las especificaciones técnicas se encuentran en el anexo E.

2.3.6 Válvula de globo. La válvula de globo es un dispositivo reconocido por la forma redonda de su cuerpo asimilándose a un globo, se caracteriza porque el flujo de entrada o salida es perpendicular al eje obturador, posee un volante que al girarlo permite el descenso del vástago que bloquea el paso del fluido.<sup>26</sup> Esta válvula si permite la regulación de caudal gracias al diseño de doble cámara que esta posee.<sup>19</sup> La válvula instalada en el tren de evaporación es una tipo termodinámica sin filtro. En el anexo J se muestran la totalidad de las válvulas instaladas en el tren de evaporación en un diagrama P D F .

---

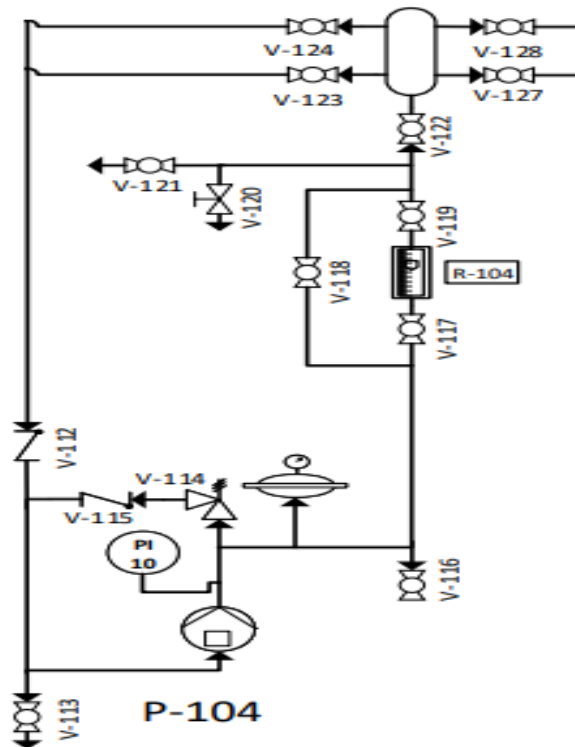
<sup>25</sup>SIERRA, Emilio. NTP 510: Válvulas De Seguridad: Selección. España: 1999. p. 1-3

<sup>26</sup> ROSA, Antonio. Tipos de Válvulas más Comunes y sus Usos. [Consultado el Oct 2,2018].

Disponible en: <https://www.grupodelpin.com/2016/12/01/tipos-de-valvulas-mas-comunes-y-sus-usos/>

### 2.3.7 Sistema de bombeo.

Figura 20. Sistema de bombeo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

El sistema de bombeo al siguiente efecto consta de dos válvulas de cheque V-112 y 115 las cuales no permiten el retorno de líquido al anterior efecto, la válvula V-113 sirve para realizar la descarga, posteriormente se encuentra una bomba dosificadora que permite impulsar el fluido al siguiente efecto, las especificaciones técnicas de la misma se encuentran en el anexo B. A la salida de la bomba se encuentra un indicador de presión que mide la fuerza con la que sale el fluido. Continuando con esa línea se encuentra un amortiguador de pulsaciones que sirve para eliminar las vibraciones generadas por los equipos en tuberías largas y además ayudan a suprimir el golpe de ariete, este accesorio comúnmente se instala después de una bomba de tipo neumática.

Al pasar por el amortiguador hay dos vías, la primera lleva a la V-116 donde se realiza la descarga o purga y la segunda lleva al sistema de medición de caudal más conocido como rotámetro el cual posee un sistema de bypass compuesto por tres válvulas (V-117, 118 y 119) que permite controlar el uso del elemento de medición de caudal, posteriormente se encuentran ubicadas la V-120 y 121 que sirven como toma muestras o vaciado, una vez el fluido pasa a través del rotámetro se llega a un

distribuidor de flujo tipo marrano, el cual consiste en un arreglo de válvulas que permite enviar el fluido al siguiente efecto o al tanque de productos. Las válvulas análogas a las mencionadas anteriormente para los sistemas de bombeo a los 3 evaporadores se presentan a continuación.

*Tabla 3. Válvulas en los sistemas de bombeo*

Evaporador chaqueta	Evaporador calandria vertical	Evaporador calandria horizontal
V-112	V-65	V-87
V-115	V-68	V-90
V-113	V-66	V-88
V-116	V-69	V-91
V-117	V-70	V-92
V-118	V-71	V-93
V-119	V-72	V-94
V-120	V-73	V-95
V-121	V-74	V-96

Fuente: elaboración propia

Las válvulas presentes en los manifolds o distribuidores tipo marrano se presentan en la siguiente tabla.

*Tabla 4. Manifolds del sistema de bombeo*

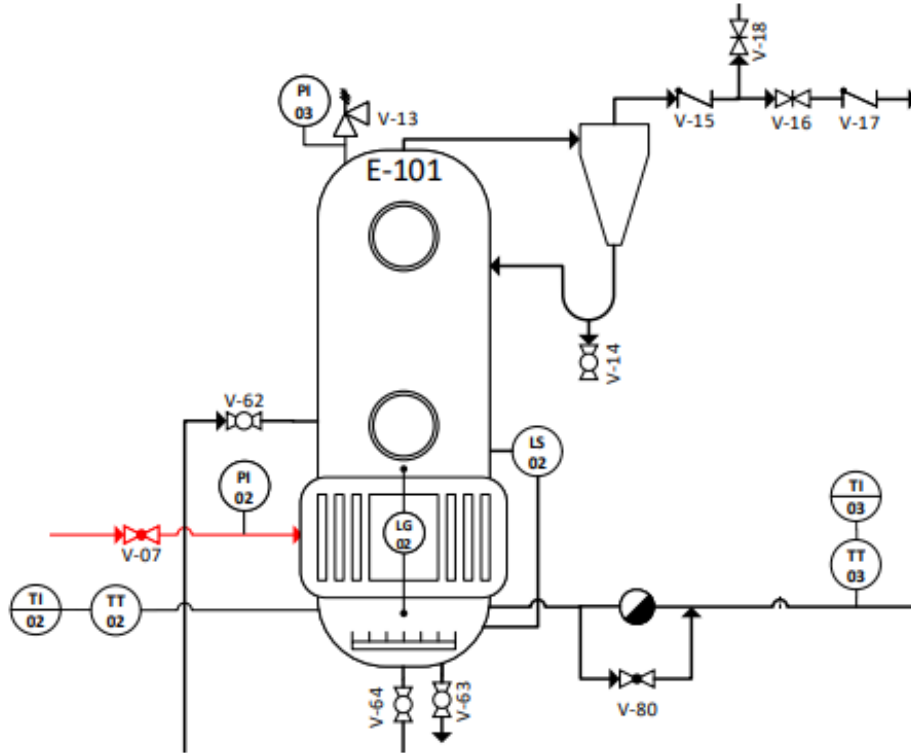
Evaporador chaqueta	Evaporador calandria horizontal	Evaporador calandria vertical	Con destino a
V-123	-	V-77	Evaporador calandria horizontal
V-124	V-98	-	Evaporador calandria vertical
V-127	V-100	V-76	Tanque de productos
V-128	-	-	Evaporador de circulación forzada
-	V-101	-	Evaporador de chaqueta

Fuente: elaboración propia



## 2.4 EVAPORADOR DE CALANDRIA VERTICAL (TUBOS VERTICALES)

Figura 21 Evaporador de calandria vertical



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Este evaporador está compuesto por tres secciones, la sección de transferencia de calor, el cabezal inferior y la cámara de separación poseen un diámetro de 0.25 metros. La primera sección está constituida por un haz de 12 tubos de 1" de diámetro y con una longitud de 25 cm en arreglo vertical con un conducto de retorno central de 4" de diámetro.

La segunda sección correspondiente a la cámara de separación la cual posee una altura de 0.6m y cuenta con un sensor tipo Bourdon descrito en la sección 2.4.1 para medir la presión y un termopar tipo j para medir la temperatura descrita en la sección 2.2.4. Una vez la solución es evaporada y luego de pasar por la sección de separación, el vapor formado en el proceso se lleva a un ciclón mencionado en la sección 2.4.2, el cual remueve por medio de una válvula de bola dicho fluido o puede retornar al evaporador.

Todas las secciones del evaporador estar aisladas con un recubrimiento en fibra de vidrio. El equipo cuenta con indicador de nivel el cual controla el flujo de alimento por medio de una electroválvula, todas descritas específicamente en la sección 2.2.2 y 2.4.3 respectivamente.

El equipo cuenta con una válvula de alivio descrita en la sección 2.4.4, un indicador de presión a la entrada tipo Bourdon, válvula de regulación y una trampa de vapor descrita en la sección 2.4.5 en la línea de condensados

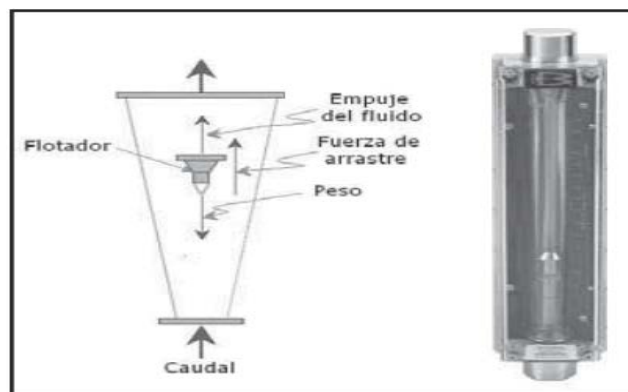
Cabe mencionar que cada uno de los evaporadores mencionados anteriormente en la sección 2.4 y 2.5 poseen un sistema que permite la regulación manual de los flujos de entrada por medios de válvulas de globo y rotámetros previamente calibrados.

Por la V-62 ingresa el fluido a evaporar, la V-63 permite hacer el vaciado del tanque, la V-64 permite enviar el producto al siguiente efecto o al tanque de producto, la línea en donde se encuentre ubicado la trampa de vapor permite enviar el vapor vivo condensado en el evaporador; allí se encuentra la V-80 que sirve como Bypass para omitir la trampa instalada, por último, la válvula V-14 permite evacuar las gotas condensadas en la sección de vapor. La línea emergente del ciclón cuenta con 2 válvulas de cheque (V-15 y 17) y dos válvulas de compuerta (V-16 y 18) que permiten enviar el vapor producido a siguiente efecto o a condensador de vapor.

2.4.1 Válvula de compuerta. Esta válvula no permite la regulación de caudal ya que al intentar hacer esta operación doblará el disco vertical plano que posee, es por esto que es una válvula únicamente construida con el fin de servir como un dispositivo ON-OFF. Tiene una ventaja de presentar una muy baja resistencia al flujo cuando se encuentra completamente abierta. En el anexo K se encuentran las válvulas de compuerta presentes en el tren de evaporación.

2.4.2 Rotámetros.

*Figura 22. Rotámetro*



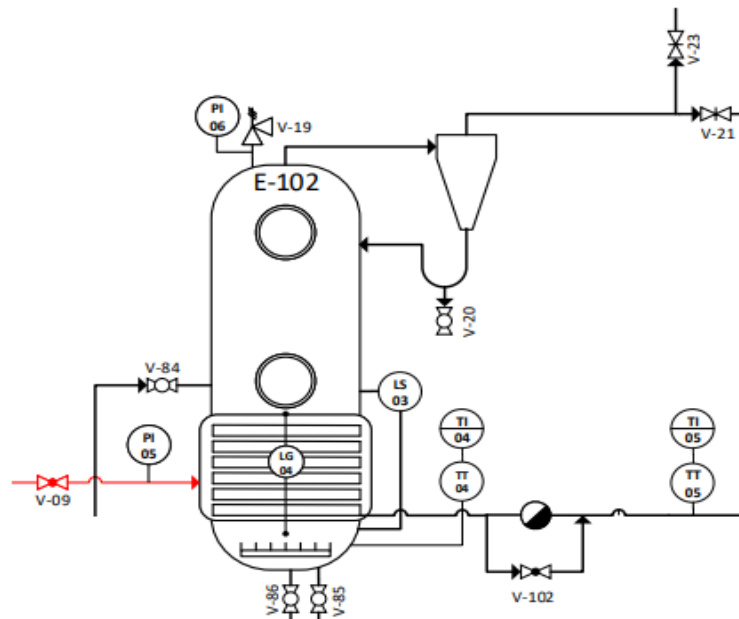
Fuente: CREUS, Antonio. Instrumentación Industrial. 8 ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 2010. p. 254-257

Este consta de un flotador que cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. El flotador se encuentra en equilibrio entre su peso, la fuerza de arrastre del fluido y la fuerza de empuje del fluido sobre el flotador. El caudal depende del peso específico del fluido, de su viscosidad y de los valores de la sección interior del tubo debido a que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador.

Su funcionamiento se basa en la medición del desplazamiento vertical de un elemento sensible (flotador), cuya posición de equilibrio depende del caudal circulante que conduce simultáneamente a un cambio en el área del orificio de pasaje del fluido, de esta manera, la diferencia de presiones que actúan sobre el flotador permanece prácticamente constante. Este instrumento está compuesto de dos partes, es tubo cónico que puede ser de vidrio o algún metal, dependiendo de la presión a la cual se trabaje y un flotador; la geometría del tubo está dada por la relación que hay entre el diámetro interno del tubo y el diámetro de la cabeza del flotador que normalmente es 1.2 a 1.35 además, cuentan con un indicador de nivel grabado a lo largo del tubo que permite la lectura rápida del caudal.<sup>27</sup> En el anexo F presenta la ficha técnica de los rotámetros instalados en el tren de evaporación.

## 2.5 EVAPORADOR DE CALANDRIA HORIZONTAL

*Figura 23. Evaporador de calandria horizontal*



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

<sup>27</sup> CLIMATE TECHNOLOGIES, Emerson. El rotámetro. -06-23 15:40. p. 1

Este evaporador al igual que los anteriores mencionados posee gran similitud en los accesorios que lo componen. La principal diferencia radica en el arreglo de tubos que se encuentran en la zona de intercambio de calor, los cuales están ubicados de forma horizontal con un total de 11 tubos de 1" de diámetro y con 25 cm de longitud.

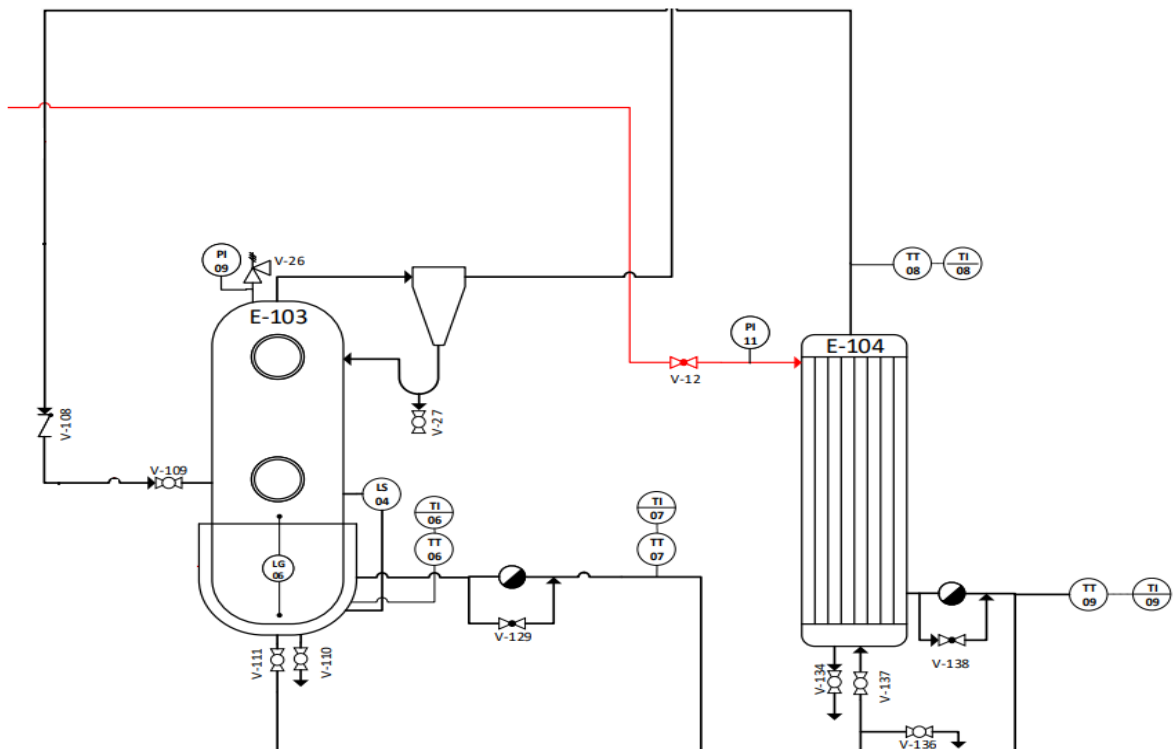
Está constituido por 3 secciones, la sección de transferencia de calor, un cabezal inferior y la cámara de separación cada uno con un diámetro de 0.25 m.

Por la válvula V-84 entra el fluido a evaporador, la V-85 sirve para realizar el vaciado del dispositivo, la V-86 envía el concentrado al sistema de bombeo que puede llevar el fluido al tanque de producto, al evaporador de calandria vertical o al evaporador de chaqueta.

La válvula V-20 permite recolectar las gotas condensadas al pasar por el ciclón, así mismo la línea en la que se encuentra instalada la trampa de vapor posee una válvula de bola V-102 que sirve como bypass, las válvulas V-21 y 23 envían el vapor producido al siguiente efecto o al condensador.

## 2.6 EVAPORADOR DE CIRCULACIÓN FORZADA

Figura 24. Evaporador de circulación forzada



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Este dispositivo consta de un intercambiador de tubos y coraza vertical con un total de 9 tubos de ½” de diámetro y 50 cm de longitud y la coraza posee un diámetro interno de 5 “, al cual ingresan dos corrientes, el vapor vivo proveniente de la caldera por medio de la válvula V-12 y el alimento a evaporar que llega de la válvula V-137.

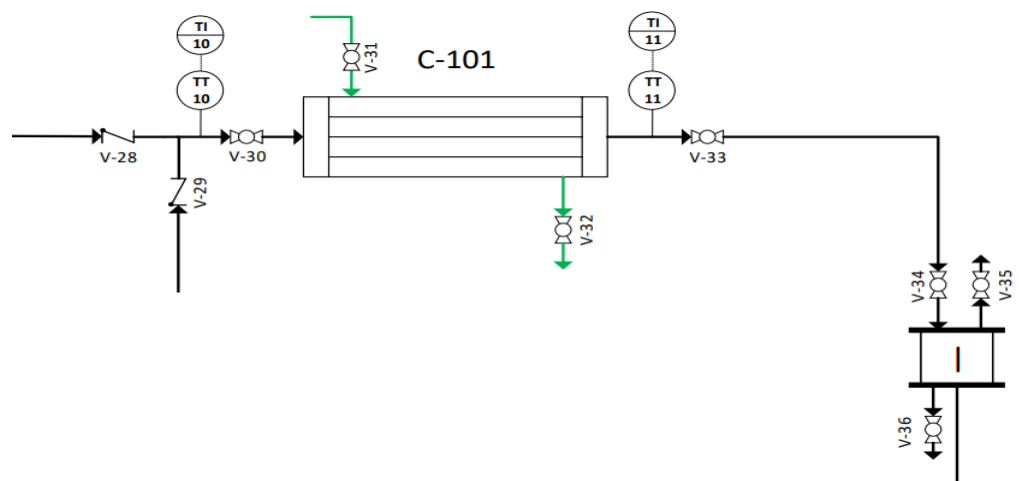
La válvula V-134 permite hacer el vaciado del intercambiador de calor E-104, adicionalmente la V-136 sirve como toma muestras del alimento que entra al intercambiador. Al igual que los demás evaporadores la línea de vapor vivo condensado tiene instalado una trampa de vapor y en ella se encuentra la V-138 que funciona como bypass, las demás válvulas son descritas en el evaporador de chaqueta.

En este dispositivo se encuentran instaladas trampas de vapor para el condensado, indicadores de temperatura dos válvulas de globo y dos de bola, para hacer un bypass, para como sistema de entrada del alimento al intercambiador de calor, para realizar el vaciado del tanque y para tomar muestras del alimento a la entrada respectivamente.

Una vez se realiza la transferencia de calor en el intercambiador se encuentra ubicado un indicador de temperatura y pasa directamente a la zona de separación del evaporador de chaqueta descrito en la sección 2.4 en donde se realiza la separación de las fases.

## 2.7 CONDENSADOR DE VAPOR

*Figura 25. Condensador de vapor*

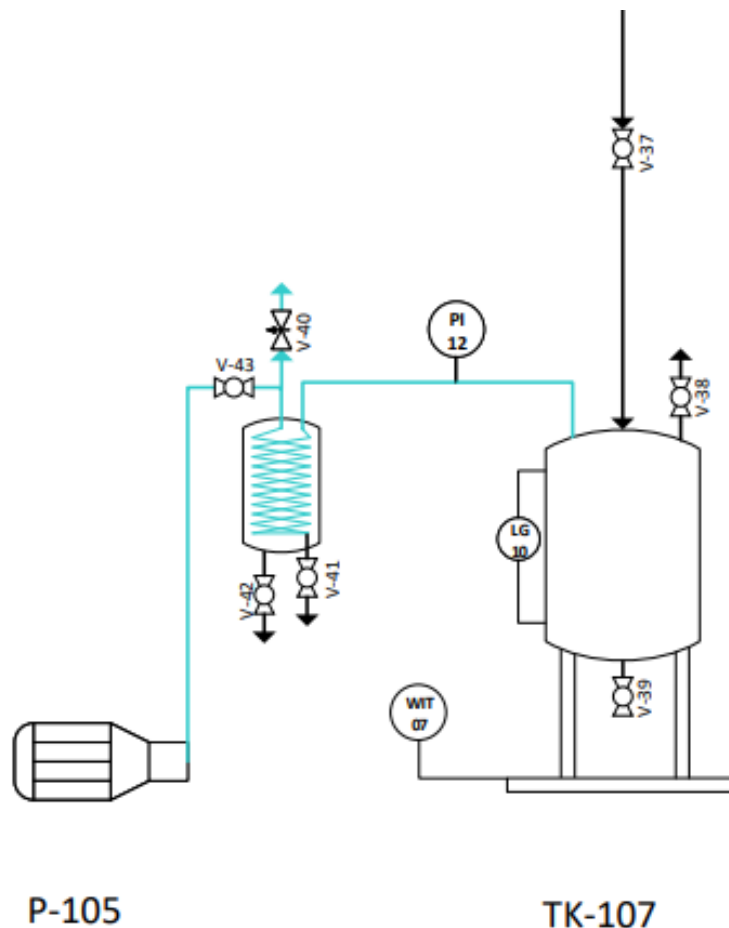


Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

El dispositivo de condensación corresponde a un intercambiador de calor de tubos y coraza de 5" de diámetro con un total de 10 tubos 1/2" de diámetro NPT con una longitud de 50 cm donde el vapor producido por los efectos del evaporador es condensado.

El vapor producido pasa a través de las válvulas de cheque V-28 y 29 que impide el retorno de vapor al evaporador, posteriormente se encuentra una válvula de globo V-30 antes de entrar al sistema de intercambio de calor. Por las válvulas V-31 y 32 circula el agua de enfriamiento, una vez se produce el intercambio se encuentra un indicador de temperatura seguido de una válvula de globo V-33 y, por último, el vapor condensado ingresa por la válvula V-34 pasando por un visor de condensación de 1 litro que tiene una válvula de bola V-35 para realizar alivio atmosférico y otra (V-36) para tomar muestras.

*Figura 26. Tanque de recolección de condensados*



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

El tanque de recolección de dicho condensado tiene una capacidad de 30 litros y cuenta con un arreglo de válvulas de nivel visible externo en 1/2" más conocidas como mirillas de vidrio, una conexión para alivio atmosférico por medio de una válvula de bola, una línea de entrada, un acople a línea de vacío con válvula de aguja, un indicador de presión 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. Las especificaciones de la bomba de vacío se encuentran el anexo B.

2.7.1 Válvula de aguja. Este dispositivo es llamado así por el vástago cónico que hace de obturador sobre un orificio que permite el paso del fluido. La válvula es una buena reguladora ya que el desplazamiento del vástago se produce girando un buen número de veces el volante debido a que es de rosca fina, gracias a esto mantiene una gran estabilidad, precisión.<sup>28</sup>

2.7.2 Bomba de vacío. Este es un equipo diseñado para extraer gases del interior de recipientes, redes de tuberías o en cualquier proceso donde se requiera reducir la presión interior de un sistema, a valores inferiores a la atmosférica. Las bombas de vacío poseen una rueda que posee paletas las cuales gracias a la fuerza centrífuga son empujadas hacia la caja formando cámaras de diferentes tamaños, cuando esta cámara se expande con la rotación el aire se expande, la presión del aire desciende y se genera vacío. Gracias a este proceso, el aire aspirado y sale comprimido.<sup>29</sup>

## 2.8 TABLERO DE CONTROL.

Unidad con interfaz gráfica HMI para el monitoreo remoto de las variables del proceso en cada uno de la configuración de operación del equipo (Simple efecto, forzada, doble efecto, triple efecto y mixto). La interfaz permite energizar todas las bombas del sistema y establecer el caudal en las bombas dosificadoras. El sistema a su vez cuenta con alarmas sonoras en las condiciones de mínimo y máximo nivel de los evaporadores.

## 2.9 OPERACIÓN

De acuerdo al fabricante del equipo, el tren de evaporadores adquirido por la Fundación Universidad de América puede operar en diferentes configuraciones empleando los evaporadores que lo componen, la dirección del flujo de vapor. En la

---

<sup>28</sup> Valvias. Válvula de Aguja - Valvias. [Consultado el Oct 2,2018]. Disponible en: <http://www.valvias.com/tipo-valvula-de-aguja.php>

<sup>29</sup> SCHMALZ. BOMBAS DE VACÍO. [Consultado el Oct 2,2018]. Disponible en: <https://www.schmalz.com/es/saber-de-vacio/el-sistema-de-vacio-y-sus-componentes/generadores-de-vacio/bombas-de-vacio/>

tabla 5 se presentan las diferentes configuraciones en las que se puede operar el tren de evaporación.

*Tabla 5. Configuraciones para el tren de evaporación*

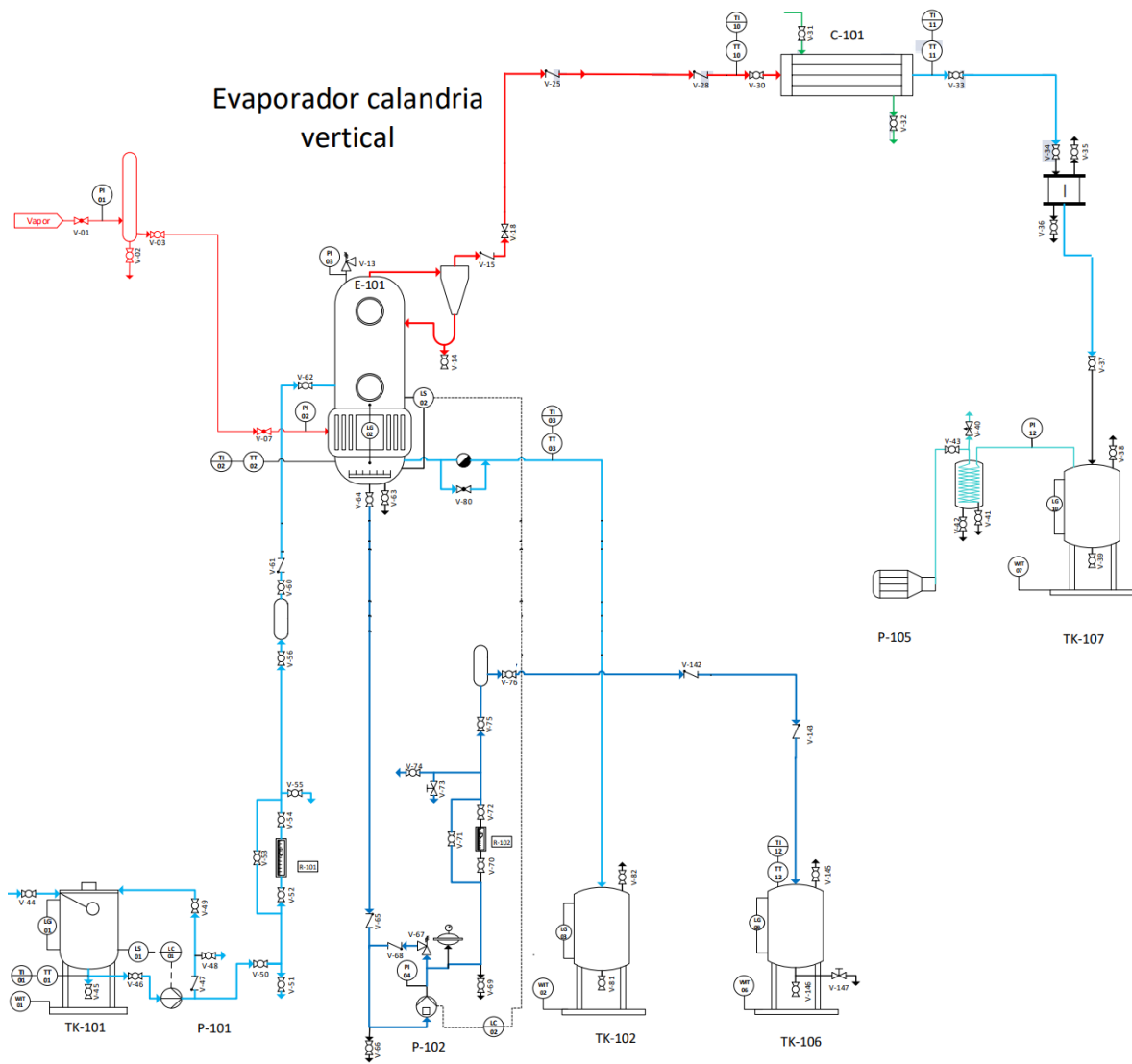
Tipos de operación	Configuraciones posibles	configuraciones de referencia
Simple efecto	3	Chaqueta
Circulación forzada	1	Chaqueta
Dos efectos en paralelo	1	Calandria 1 - Chaqueta
Dos efectos en contracorriente	1	Calandria 1 – Chaqueta
tres efectos en paralelo	1	Calandria 1 – Chaqueta-calandria 2
Tres efectos en contracorriente	1	Calandria 1 – Chaqueta-calandria 2

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

La evaporación de simple efecto se puede realizar para cada uno de los evaporadores instalados en el tren de evaporación (calandria horizontal, calandria vertical y chaqueta). El juego de válvulas presentes en el tren de evaporación permite que cada uno pueda operar de manera independiente. La operación de simple efecto se puede apreciar en la figura 27 se puede apreciar el PFD de la evaporación simple utilizando el evaporador de calandria vertical. Como se puede apreciar existen diferentes colores presentes en el diagrama; el color rojo simboliza la circulación del vapor de agua en la evaporación simple, el color azul claro representa la cantidad de vapor vivo condensado en dicho efecto, así como también el alimento que entra al evaporador, el color negro presente en la tubería instalada representa la inactivación de la tubería ya que no hace parte del arreglo en simple efecto y por último el azul oscuro representa el producto concentrado. Como se explica en la sección 2.8.2, el sistema cuenta con una bomba de vacío la cual puede ser usada en cada uno de los efectos.



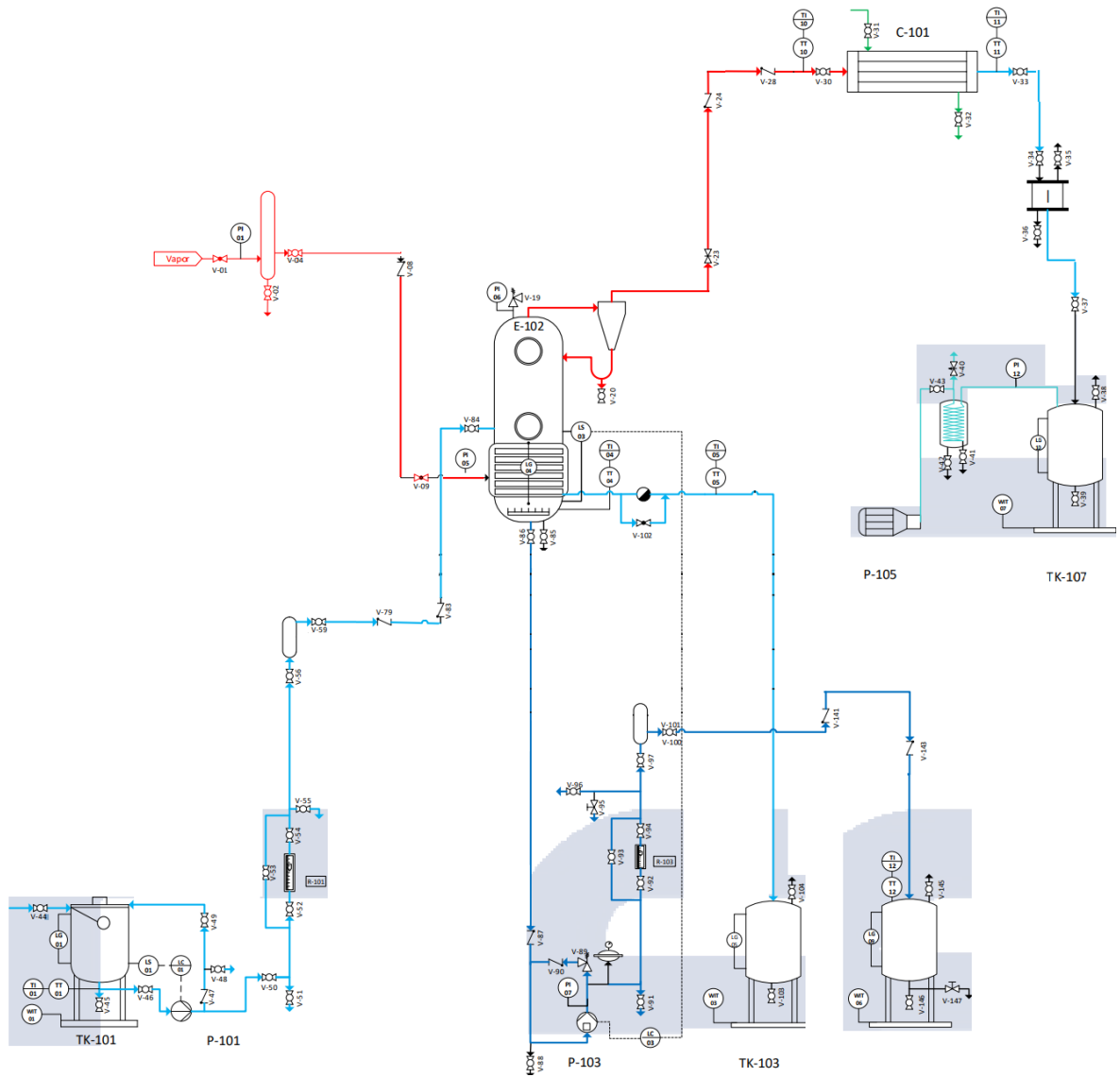
Figura 27. PFD Evaporador calandria vertical



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

De igual forma se puede apreciar en la figura 28 el PFD del evaporador de calandria horizontal en el que únicamente cambian las tuberías que guían el alimento, condensado y concentrado, así como el vapor vivo.

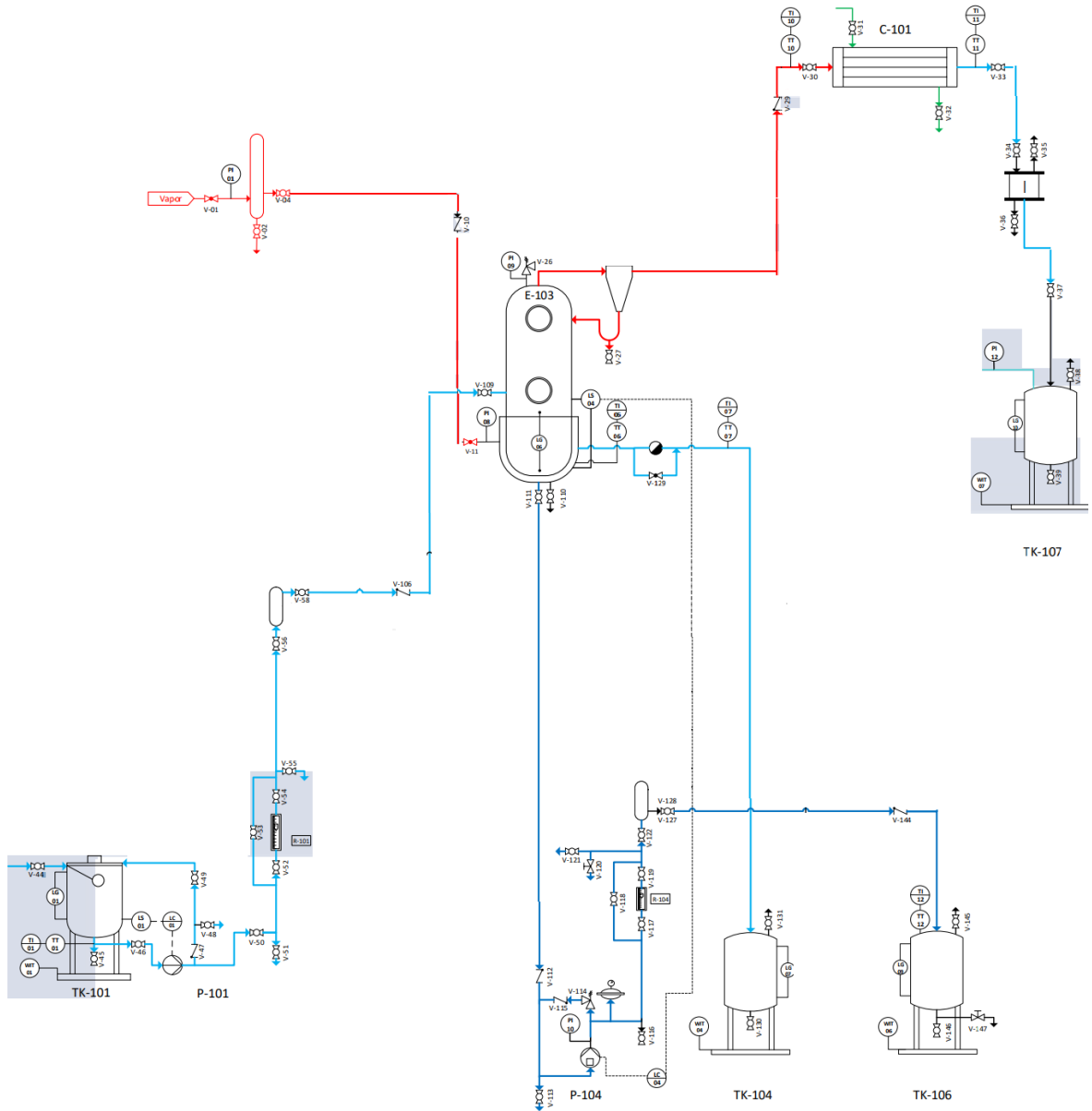
Figura 28. PFD Evaporador de calandria horizontal



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

En la figura 29 se muestra el PFD del evaporador de chaqueta en efecto simple.

Figura 29. PFD evaporador de chaqueta efecto simple

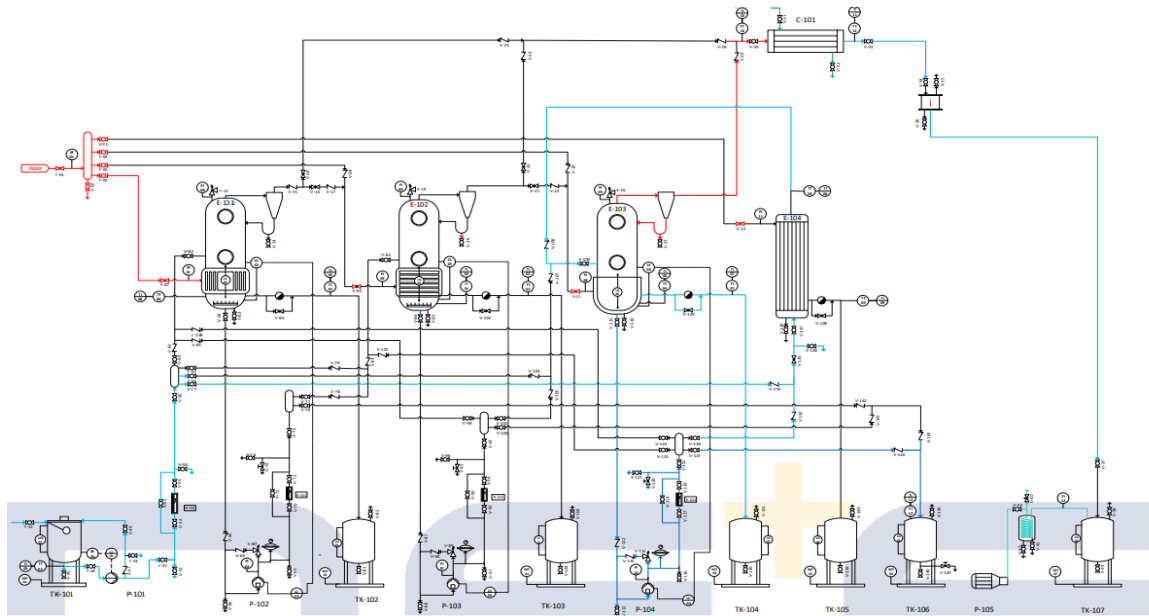


Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

La evaporación por circulación forzada es descrita en la sección 2.8, en ella se hace uso de un intercambiador de tubos y coraza externo al cual ingresa la corriente de alimento, se produce el intercambio de calor e inmediatamente es enviado a la zona de separación de evaporador de chaqueta. En la figura 30 se muestra el PFD de dicho evaporador.

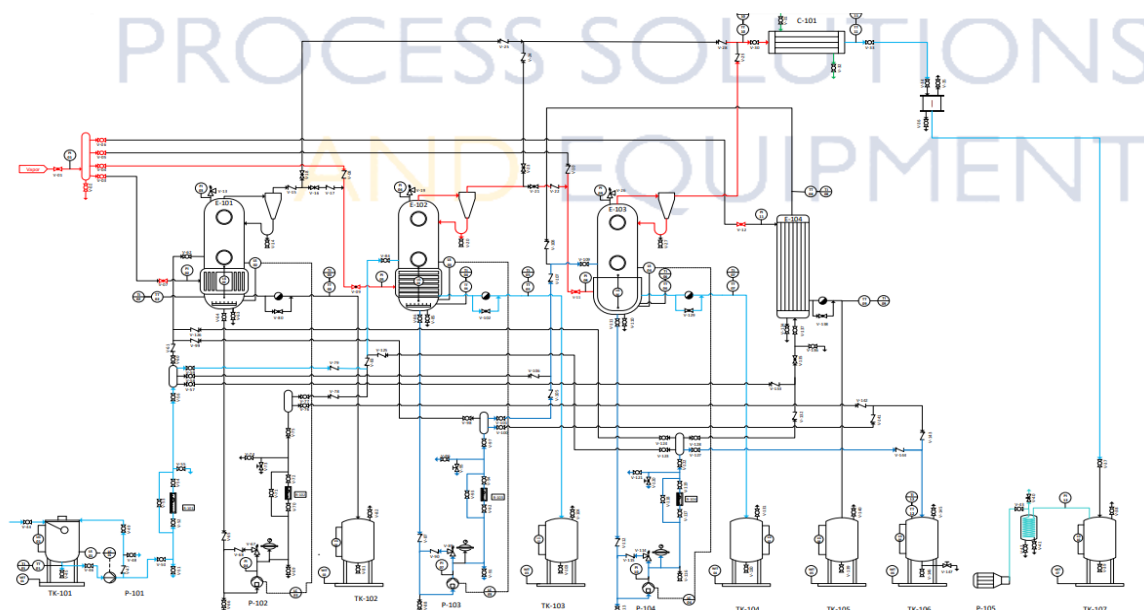
En la figura 31 se presenta el arreglo de doble efecto con alimentación en paralelo, es decir que el vapor vivo y el alimento viajan en la misma dirección. En la figura presentada se hace uso de dos evaporadores, el de calandria horizontal al cual ingresa tanto el alimento como el vapor vivo y el de chaqueta del cual emerge la solución concentrada. Cada resaltar que no solo existe dicha posibilidad anteriormente mencionada, también se puede hacer uso del evaporador vertical, junto con el evaporador horizontal o el de chaqueta. Este arreglo también puede trabajar a vacío haciendo uso de la bomba P-105.

*Figura 30. PFD evaporador de circulación forzada*



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

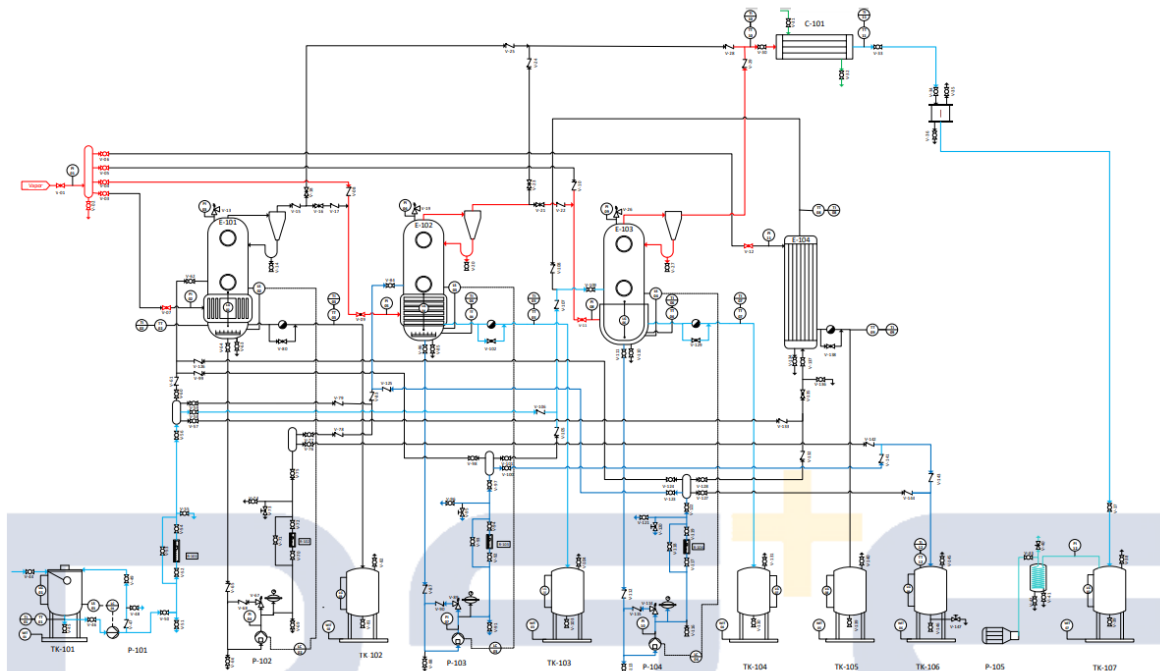
Figura 31. PFD evaporación de doble efecto con alimentación en paralelo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

El arreglo en contra corriente indica que el alimento viaja en dirección contraria al vapor vivo, es por esto que en la figura 32 se puede observar como el alimento ingresa al evaporador de chaqueta, mientras que el vapor vivo ingresa al evaporador de calandria horizontal. Las configuraciones pueden cambiar según el uso que se le a los evaporadores, así pues, se podría utilizar el evaporador de chaqueta y el de calandria vertical también el de calandria horizontal y posteriormente el de calandria vertical.

Figura 32. PFD Evaporación doble efecto con alimentación en contra corriente.

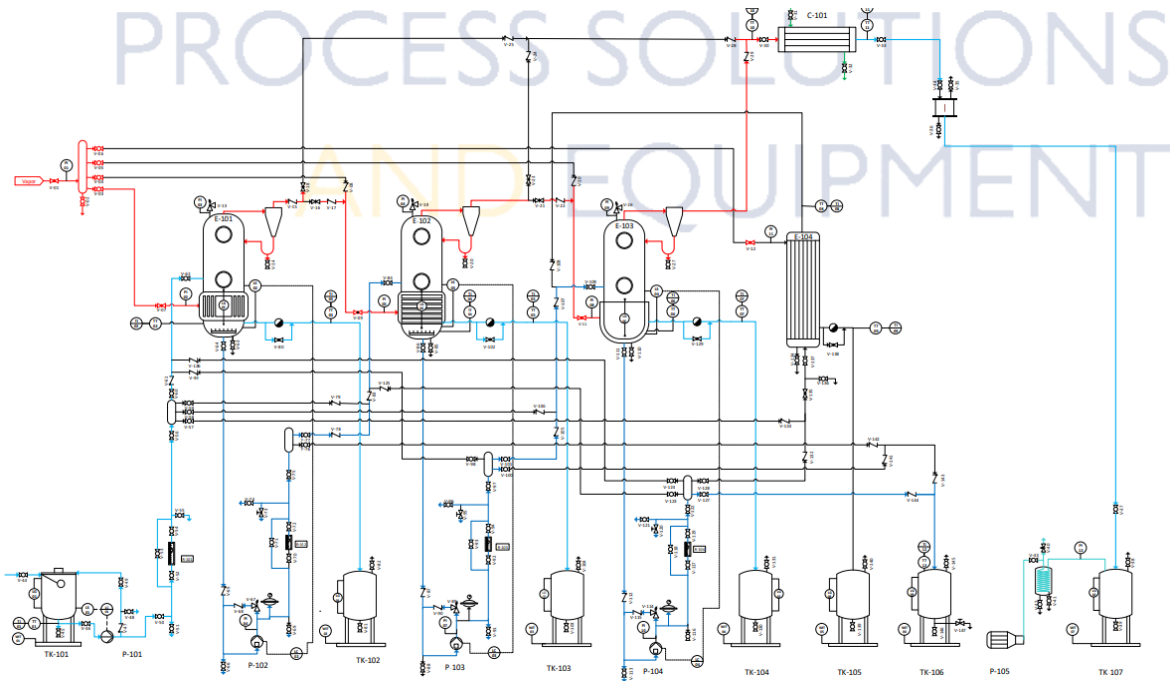


Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

La configuración más robusta en la cual se hace uso total del equipo es la de triple efecto, en la que se utilizan cada uno de los evaporadores presentes en la planta piloto (calandria horizontal, vertical y chaqueta). En la figura 33 se puede observar la configuración en paralelo en donde tanto el vapor vivo como el alimento ingresan al mismo evaporador y ambos siguen la misma ruta terminando en el evaporador de chaqueta. Se puede hacer uso de la bomba de vacío en el tren de evaporación permitiendo disminuir la temperatura de ebullición en cada efecto.

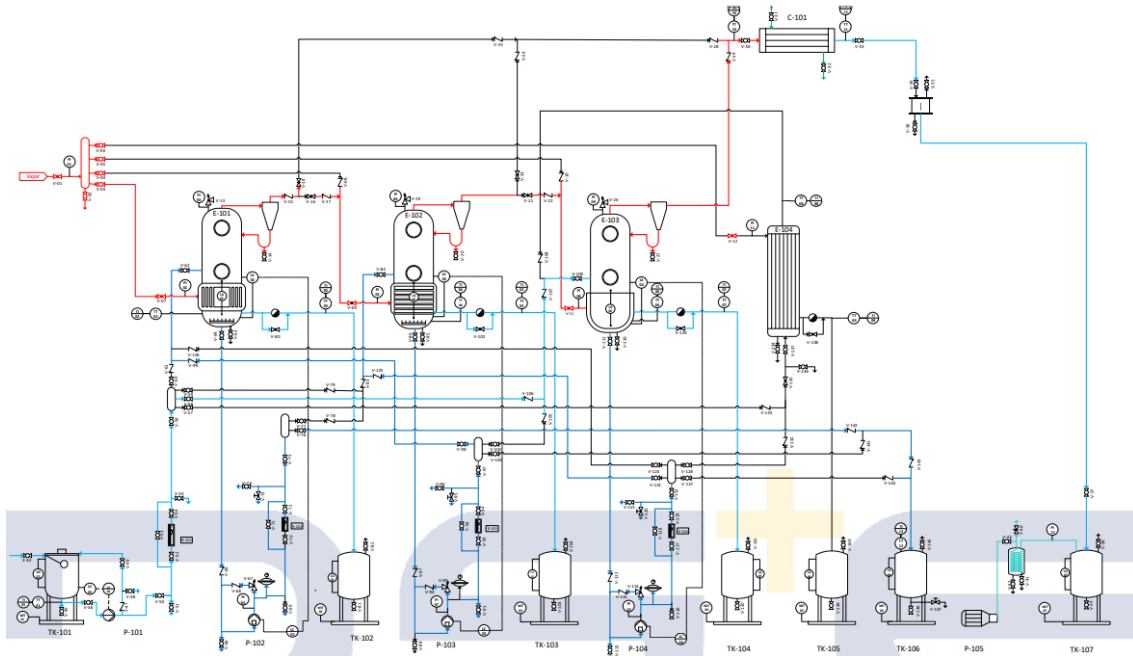
En la figura 34 se observa el arreglo en contracorriente en el cual el alimento entra al último efecto, mientras que el vapor ingresa al primero. De la misma forma en la figura 35 se encuentra la alimentación mixta, en ella el alimento entra al 2 efecto y posteriormente pasa al tercer efecto y por último ingresa al primero.

Figura 33. PFD Evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo



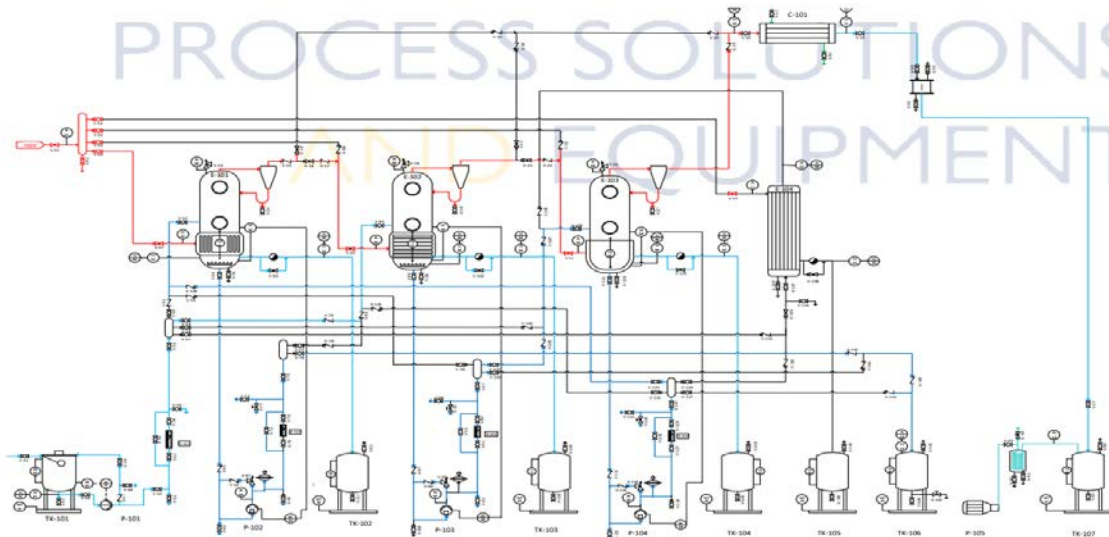
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Figura 34. PFD Evaporación de triple efecto con alimentación en contra corriente



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Figura 35. PFD Evaporación de triple efecto con alimentación mixta



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62



### 3. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE TREN DE EVAPORACIÓN

Este capítulo tiene como objetivo realizar el modelamiento y la simulación del tren de evaporación adquirido por la Fundación Universidad de América bajo las condiciones establecidas por el fabricante con el fin de realizar una primera aproximación a dicha planta y conocer de primera mano el comportamiento que puede tener el tren de evaporación sin la necesidad de la realizar la manipulación de los equipos, lo que ayuda a que estos no sufran deterioro por mala manipulación y en cambio, la simulación sirva como una herramienta educativa para que el estudiantado pueda adquirir el dominio sobre el tema, aplicando los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de ingeniería Química y en futuras ocasiones, a validar procesos realizados a escala piloto en el tren de evaporación.

#### 3.1 MODELAMIENTO DE PROCESOS

El concepto de modelamiento ha sido tratado por diversos autores que se traen a colación a continuación enunciando sus definiciones:

- Representación física, matemática o de cualquier otro tipo lógico, de un sistema, entidad fenómeno o proceso<sup>30</sup>.
- Representación simplificada de la realidad en la que aparece alguna de sus propiedades<sup>31</sup>.
- Representación simplificada de un sistema desde un punto de vista particular en el tiempo y el espacio para proporcionar el entendimiento del sistema real.<sup>32</sup>

De acuerdo a las anteriores definiciones se puede concluir que un modelamiento es:

Una abstracción de la realidad en la que se tienen en cuenta propiedades esenciales que permiten describir y analizar de manera comprensible el objeto de estudio.

Para que un modelo pueda ofrecer información valiosa se hace necesario que exista una relación simétrica con la realidad, es decir que la relación entre el objeto real y

---

<sup>30</sup> Department of Defense United States of America. DOD Modeling and Simulation (M&S) Glossary. Washington D.C: 1998. p. 45

<sup>31</sup> COSS BU, Raúl. Simulación Un Enfoque Práctico. 1 ed. MÉXICO: Limusa, 2003. p. 11-139681815068

<sup>32</sup> BELLINGER, Gene. Modeling & Simulation. Outsights Corp, 1997. p. 48

el modelo sea parcialmente reversible para así garantizar que cada cuestión a estudiar pueda ser aplicada a la realidad.<sup>33</sup>

3.1.1 Modelamiento matemático. Los modelos pueden ser físico como su nombre lo indica es una representación física, palpable a escala de un objeto. Estos modelos son construidos en estado estacionario teniendo en cuenta todas las propiedades del objeto real, se hace uso de dimensiones las cuales pueden ser de 2 a máximo tres dimensiones. Los modelos analógicos son otro tipo de modelamiento en el que se pueden describir escenarios a lo largo del tiempo (dinámicos) haciendo uso de la similitud entre procesos y, por último, los modelos matemáticos son representaciones aproximadas de un proceso u operación haciendo uso de ecuaciones matemáticas<sup>34</sup> Gracias a la utilización de este último modelamiento es que se pueden entender claramente y además realizar un control y predicción sobre el objeto<sup>35</sup>.

El modelamiento matemático se clasifica en dos grandes grupos, el cualitativo y el cuantitativo. El modelamiento matemático cuantitativo hace referencia al uso de variables y constantes en cantidad considerable, es decir que ya se conoce el valor numérico de la variable, caso contrario ocurre con los modelos cualitativos ya que en estos modelos es difícil realizar el cálculo exacto de los valores de las variables por razones como: variables desconocidas, relaciones complejas para expresar de forma cuantitativa entre otras, es por esto que se recurre a establecer las cualidades de los componentes por medio de análisis lógico, investigación de operaciones y análisis de decisión para poder encontrar los valores del sistema<sup>34</sup>.

3.1.2 Modelamiento matemático de un evaporador. El proceso de concentración de diferentes sustancias puede ser representado por medio de un modelamiento matemático del tipo fenomenológico basado en el principio de conservación de materia y energía con el fin de facilitar su comprensión y representación.<sup>8</sup>

La principal diferencia que existe entre los diferentes modelos radica en el cálculo de las propiedades termo-físicas de las sustancias a evaporar como el caso del coeficiente global de transferencia de calor, calor latente de evaporación, capacidad calorífica entre otros, además de las simplificaciones y relaciones aplicadas en el proceso.

---

<sup>33</sup> FELICÍSIMO, Angel. Modelos Digitales Del Terreno. Introducción Y Aplicaciones En Las Ciencias Ambientales. Pendalfa Editores, 1994. p. 3-49788478484751

<sup>34</sup> GÓMEZ,Elvis. Modelamiento Y Simulación Del Sistema De Evaporación De Jugo Clarificado Para La Etapa De Ampliación De Molienda De La Empresa Agroindustrial San Jacinto&nbsp; Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo, 2014. p. 30-33

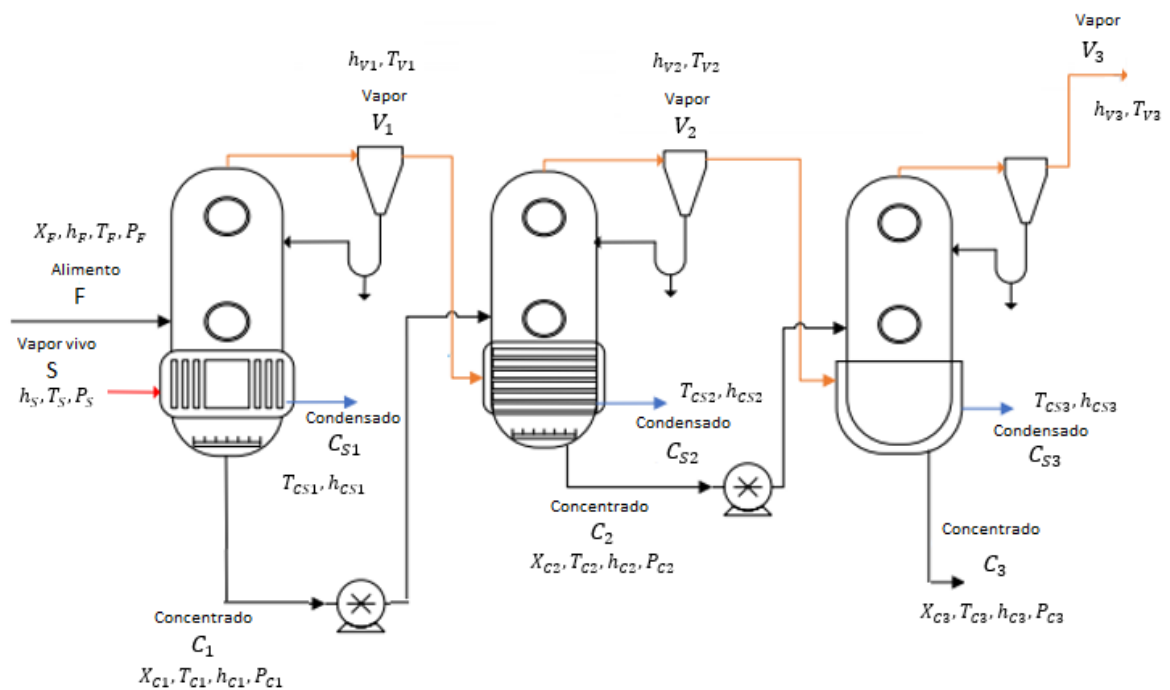
<sup>35</sup> Álvaro Núñez; Enrique Tarifa y Norma Farfán. STATIONARY SIMULATION OF A DOUBLE EFFECT EVAPORATOR FOR TOMATO JUICE. En: Avances En Ciencias E Ingeniería. Dec 1,, vol. 3, no. 4, p. 1-9

Tal es el caso de Polo<sup>36</sup> que realizó el modelado y análisis de un evaporador de doble efecto para una mezcla de trietilenglicol en agua a partir de ecuaciones no lineales y resuelto por matrices jacobianas.

Kaya<sup>37</sup> desarrolló el modelo para un evaporador de 4 efectos en el que tuvo en cuenta los diferentes tipos de alimentación que pueden ser usados, paralelo, contracorriente, añadiendo calentamiento previo al fluido a concentrar todo con el fin de determinar la influencia que estos cambios pueden tener en la economía del proceso.

### 3.1.3 Modelado evaporador de triple efecto.

Figura 36. Esquema evaporación de triple efecto



Fuente: Elaboración propia

El proceso tal como se muestra en la figura 36, está conformado por un tren de evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo. Al primer efecto se alimenta una solución de sacarosa- agua con un caudal másico  $F$ , una concentración de soluto  $X_F$  y una temperatura  $T_F$ . La solución se concentra en el primer efecto por el uso del vapor vivo  $S$  el cual genera dos corrientes, un caudal de vapor  $V_1$  producto de la remoción de solvente presente en la corriente  $F$  y un caudal de fondos correspondiente al soluto concentrado  $C_1$ . Adicionalmente se genera un

<sup>36</sup> POLO, Manuel; BERNÁ, Jose y GIL, Javier. Modelado análisis y control de un evaporador de doble efecto; p. 15

<sup>37</sup> KAYA, Durmus y IBRAHIM SARAC,H. Mathematical Modeling of Multiple-Effect Evaporators and Energy Economy. 2007. p. 1536-15420360-5442

condensando de vapor vivo  $C_{s1}$ . La corriente de fondos  $C_1$  es alimentada al segundo efecto por la coraza mientras que la corriente de vapor  $V_1$  se alimenta por los tubos. La solución  $C_1$  es de nuevo concentrada en el segundo efecto de la cual emergen dos corrientes, la corriente de vapor  $V_2$  producto de una segunda remoción de solvente presente en la solución, la corriente de fondos correspondiente al concentrado  $C_2$ . Al igual que sucede en el primer efecto emerge una corriente de condensado de vapor vivo  $C_{s2}$ . La corriente concentrada  $C_2$  es el nuevo alimento al tercer y último efecto ingresando por la coraza mientras que la corriente de vapor  $V_2$  ingresa por la chaqueta del evaporador. La corriente  $C_2$  es por último concentrada en el tercer evaporador del cual emergen dos corrientes principalmente; la corriente de vapor  $V_3$  que es concentrada para su posterior disposición, la corriente  $C_3$  que es el producto deseado abandona el tercer efecto con una concentración  $X_3$  la cual es una variable de diseño a cumplir adicionalmente, una corriente de condensado de vapor vivo  $C_{s3}$ .

Para desarrollar el modelo matemático del sistema se tiene en cuenta las siguientes suposiciones:

- Las paredes de los tubos y las corazas de los evaporadores tienen capacidades caloríficas despreciables y por tanto no son considerados en el balance de energía.
- Las corrientes de vapor no contienen soluto.
- El equipo no posee incrustaciones.
- Los gradientes de densidad son despreciables
- El mezclado de la solución es ideal
- El soluto es no volátil
- El evaporador no posee incrustaciones
- No hay pérdidas de calor al ambiente
- La solución no forma espuma.
- El calor de dilución se toma como despreciable
- El vapor vivo usado es saturado.

Balance de energía.

*Ecuación 2. Balance de energía para un sistema general*

$$\left( \begin{array}{c} \text{entrada de energía} \\ \text{al sistema} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{salida de energía} \\ \text{del sistema} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{acumulación de energía} \\ \text{dentro del sistema} \end{array} \right)$$

El termino de acumulación está constituido por las energías: potencial, cinética, magnética, eléctrica, interna, química, geotérmica, nuclear, eólica, solar entre otras. Los sistemas industriales como el caso de la evaporación consideran principalmente las energías potencial, cinética, interna.

De este modo en términos generales la ecuación del balance de energía se presenta a continuación.

*Ecuación 3. conservación general de la energía*

$$\left( U_{in} + gh_{in} + \frac{1}{2}v^2 \right) \frac{dm_{in}}{dt} - \left( U_{ou} + gh_{ou} + \frac{1}{2}v^2 \right) \frac{dm_{ou}}{dt} + \frac{dQ}{dt} - \frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \left( U + gh + \frac{1}{2}v^2 \right) m \right]$$

El trabajo realizado hacia el sistema posee dos componentes, el trabajo de eje W (trabajo eléctrico y mecánico) y el trabajo debido al flujo del fluido PV\*m. Por lo tanto, el trabajo realizado al sistema se expresa de la siguiente manera:

*Ecuación 4 Trabajo realizado al sistema*

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dW}{dt} + PV \frac{dm}{dt}$$

Sustituyendo este término tanto en la entrada como en la salida tenemos:

*Ecuación 5 Balance de energía incluyendo el termino de trabajo eléctrico y de eje*

$$\left( U + PV + gh + \frac{1}{2}v^2 \right)_{in} \frac{dm_{in}}{dt} - \left( U + PV + gh + \frac{1}{2}v^2 \right)_{ou} \frac{dm_{ou}}{dt} + \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \left( U + gh + \frac{1}{2}v^2 \right) m \right]$$

Los términos U+PV se conocen como entalpía definido como el calor intercambiado entre el sistema y sus alrededores. Sustituyendo el termino tenemos.

*Ecuación 6. Balance de energía con inclusión de entalpía*

$$\left( H + gh + \frac{1}{2}v^2 \right)_{in} \frac{dm_{in}}{dt} - \left( H + gh + \frac{1}{2}v^2 \right)_{ou} \frac{dm_{ou}}{dt} + \frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{d}{dt} \left[ \left( U + gh + \frac{1}{2}v^2 \right) m \right]$$

Suponiendo que tanto la energía cinética como la energía potencial son despreciables y que no hay trabajo de eje y las pérdidas de calor son despreciables, la ecuación se reorganiza de la siguiente forma:

*Ecuación 7. Simplificaciones al balance de energía*

$$(H)_{in} \frac{dm_{in}}{dt} - (H)_{ou} \frac{dm_{ou}}{dt} = \frac{d(m_1 X_1)}{dt}$$

Agrupando términos y reemplazando los elementos de entrada y salida tenemos:

*Ecuación 8 Balance de energía tren de evaporación primer efecto*

$$Fh_f - V_1 h_{v1} - C_1 h_{c1} + S\lambda_s = \frac{d(m_1 X_1)}{dt}$$

Balance de masa en el primer efecto.

*Ecuación 9. Balance de materia primer efecto*

$$\frac{dm_1}{dt} = F - V_1 - C_1 + S$$

Balance del soluto en el primer efecto.

*Ecuación 10. Balance de soluto primer efecto*

$$\frac{d(m_1 X_1)}{dt} = F X_f - C_1 X_1$$

Al trabajar en estado estacionario las ecuaciones se reescriben de la siguiente manera así las siguientes ecuaciones.

*Ecuación 11. Balance de energía en estado estacionario efecto 1*

$$F h_f - V_1 h_{V1} - C_1 h_{c1} + S \lambda_s = 0$$

*Ecuación 12. Balance de materia en estado estacionario efecto 1*

$$F - V_1 - C_1 + S = 0$$

*Ecuación 13. Balance de soluto en estado estacionario efecto 1*

$$F X_f - C_1 X_1 = 0$$

Al no ocurrir cambio de fase la entalpía entalpía de alimento y condensado puede calcularse de la siguiente manera.

*Ecuación 14. Cálculo de entalpía alimento corrientes sin cambio de fase*

$$h_f = C_p T_F$$

*Ecuación 15. Cálculo de entalpía concentrado 1 corrientes sin cambio de fase*

$$h_{c1} = C_p T_{c1}$$

Reemplazando las ecuaciones 14 Y 15 en la ecuación 11 tenemos

*Ecuación 16. Balance energía final primer efecto*

$$F C_p T_f - V_1 h_{V1} - C_1 C_p T_{c1} + S \lambda_s = 0$$

De la misma forma se realiza el procedimiento para el segundo y tercer efecto obteniendo

Segundo efecto.

*Ecuación 17. Balance de energía segundo efecto*

$$C_1 C_p T_{c1} + V_1 \Delta_{V1} - C_2 C_p T_{c2} - V_2 h_{V2} = 0$$

*Ecuación 18. Balance de materia efecto 2*

$$C_1 - V_2 - C_2 = 0$$

*Ecuación 19. Balance de soluto efecto 2*

$$C_1 X_{C1} - C_2 X_{C2} = 0$$

Tercer efecto

*Ecuación 20. Balance de energía tercer efecto*

$$C_2 C_p T_{c2} + V_2 \Delta_{V2} - C_3 C_p T_{c3} - V_3 h_{V3} = 0$$

*Ecuación 21. Balance de materia tercer efecto*

$$C_2 - V_3 - C_3 = 0$$

*Ecuación 22. Balance de soluto tercer efecto*

$$C_2 X_{C2} - C_3 X_{C3} = 0$$

Al tener en cuenta la elevación del punto de ebullición de las temperaturas en cada efecto se hace uso de una relación especificada:

*Ecuación 23. Elevación del punto de ebullición*

$$EPE = 1.78 * (X) + 6.22 * (X)^2$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

Siendo X la fracción másica presente en cada efecto.

Adicionalmente la capacidad calorífica de las diluciones líquidas se pueden calcular de la siguiente forma:

*Ecuación 24. Capacidad calorífica corrientes líquidas*

$$C_{p n} = 4.19 - 2.35 * (X)$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

Siendo X la fracción másica de soluto presente en la dilución.

3.1.4 Análisis de grados de libertad. Para el análisis de un sistema donde ocurre transferencia de energía sin reacción química, se consideran los siguientes parámetros.

**Número de variables independientes.**

8 corrientes de materia:  $S, V_1, C_1, V_2, C_2, V_3, C_3, F$

11 temperaturas:  $T_F, T_S, T_{V1}, T_{CS1}, T_{C1}, T_{V2}, T_{CS2}, T_{C2}, T_{V3}, T_{CS3}, T_{C3}$

4 capacidades caloríficas:  $C_{pF}, C_{pC1}, C_{pC2}, C_{pC3}$

3 entalpías de vapor:  $h_{v1}, h_{v2}, h_{v3}$

3 calores latentes de condensación:  $\lambda_{v1}, \lambda_{v2}, \lambda_{v3}$

4 composiciones de soluto.  $X_{C1}, X_{C2}, X_{C3}, X_F$

Total: 32

**Número de balances independiente.**

3 balances de materia

3 balances de soluto

3 balances de energía

2 balances de vapor

Total: 11

**Número de variables especificadas y relaciones especificadas**

15 variables especificadas.  $X_F, T_F, F, T_S, V_1, C_1, X_{C3}, T_{C3}, T_{CS3}, \lambda_{v1}, \lambda_{v2}, \lambda_{v3}, h_{v1}, h_{v2}, h_{v3}$

5 relaciones especificadas. 4 cálculo de capacidades caloríficas, 1 elevación punto ebullición

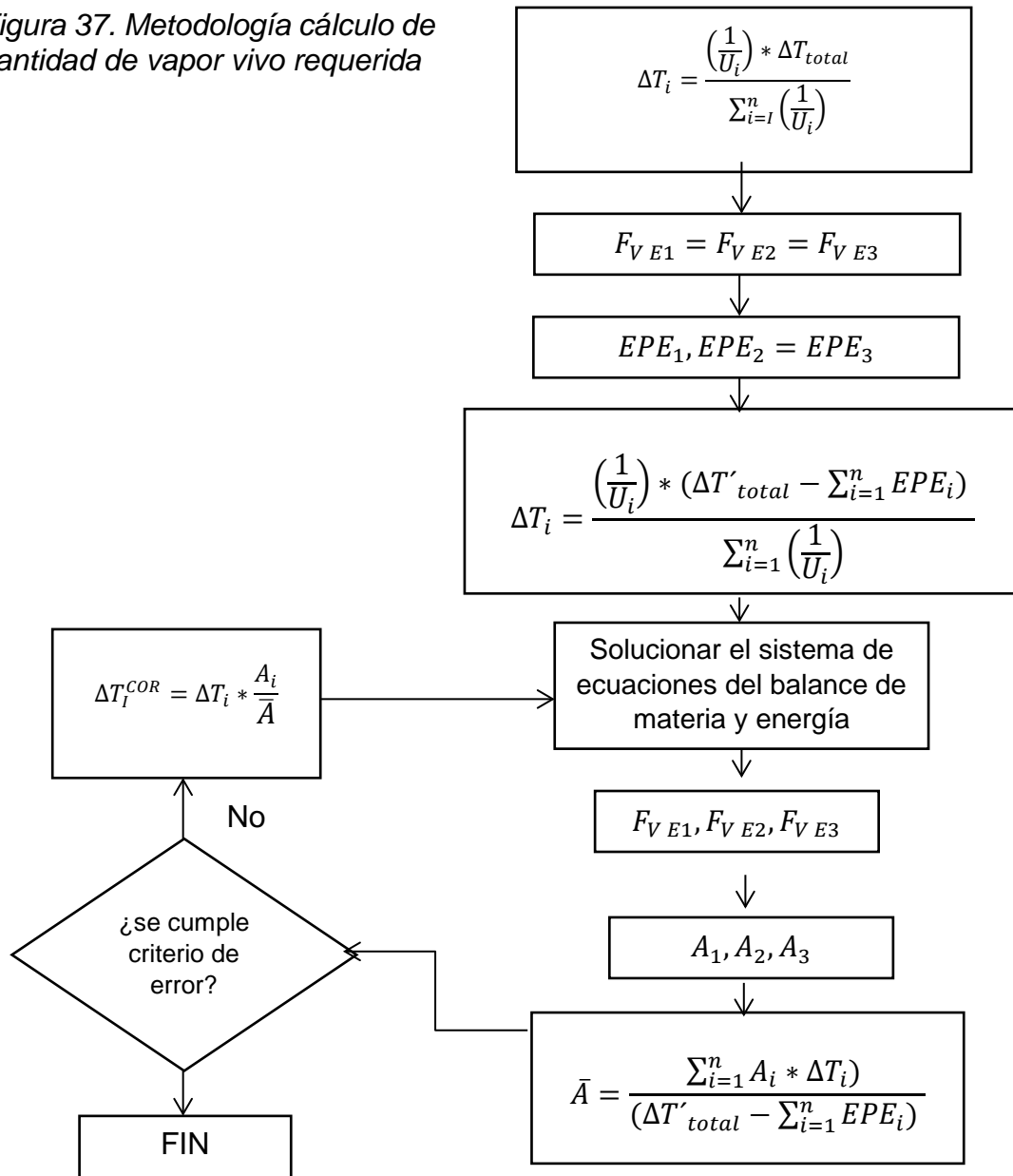
Total: 20

Grados de libertad: 1



3.1.5 solución algebraica. A continuación, se presenta la metodología seguida para realizar los cálculos <sup>38</sup> la cual se puede observar en la siguiente imagen.

Figura 37. Metodología cálculo de cantidad de vapor vivo requerida



<sup>38</sup> HERMES, A. Rangel Jara y ARGOTI, Andrés. Cálculo numérico de un evaporador químico sobre una hoja electrónica. En: Ingeniería E Investigación. Sep 1. no. 44, p. 48-55

Tabla 6. Parámetros de entrada simulación

Alimento		Vapor de H <sub>2</sub> O saturado	
Flujo másico (kg/h)	40	Temperatura (°C)	121.1
Composición inicial (%W azúcar)	10	Efecto 3	
Temperatura inicial (°C)	26.7	Presión (kPa)	13.4
Efecto 2		Temperatura (°C)	51.67
Temperatura (°C)	51.67	Solución concentrada	
		Composición final (%W azúcar)	50

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

En la tabla 6 se encuentran los datos conocidos del problema y que deben ser usados para la resolución del mismo. Para hallar la elevación del punto de ebullición del tercer efecto se utiliza la ecuación 23 reemplazando la fracción másica del soluto presente:

$$EPE = 1.78 * (0.5) + 6.22 * (0.5)^2 = 2.45^{\circ}C$$

Con el cálculo anteriormente realizado se procede a calcular la temperatura corregida del tercer efecto:

*Ecuación 25. Temperatura con EPE*

$$T_3 \text{ corregida} = T_3 + EPE_3$$

$$T_3 = 51.67 + 2.45 = 54.12^{\circ}C$$

Posteriormente se procede a realizar un balance de soluto global del sistema entorno al azúcar.

*Ecuación 26. Balance de materia global sacarosa*

$$F * X_F = C_3 * X_{C3}$$

$$22680 * (0.1) = C_3 * (0.5)$$

$$C_3 = 4536 \frac{kg}{h}$$

Al conocer la cantidad total que saldrá de líquido del efecto 3 se procede a hacer un balance de masa global.

*Ecuación 27. Balance de materia global*

$$F = C_3 + V_3$$

$$22680 - 4536 = V_3 = 18144 \frac{kg}{h}$$

Realizando la suposición de que cantidades iguales en cada efecto serán evaporadas se procede a calcular la cantidad de líquido que saldrá de cada efecto haciendo uso de la ecuación 12

$$22680 - 6048 = 16632 \frac{kg}{h} = C_1$$

Utilizando la ecuación 18 tenemos

$$16632 - 6048 = 10584 \frac{kg}{h} = C_2$$

Haciendo uso de la ecuación 13 se procede a calcular la fracción másica de la corriente de concentrado 1

$$\frac{22680 * (0.1)}{16632} = 0.136 = X_{C1}$$

Del mismo modo se calculan las concentraciones para el efecto 2 y 3 haciendo uso de las ecuaciones 19 y 22 obteniéndose los siguientes resultados.

$$0.214 = X_{C2}$$

$$0.5 = X_{C3}$$

Se procede a calcular la elevación del punto de ebullición en cada uno de los efectos con la ecuación 23 de la siguiente manera:

$$EPE_{E1} = 1.78 * (0.136) + 6.22 * (0.136)^2 = 0.36^\circ C$$

De la misma forma se realiza el procedimiento para el efecto 3 obteniéndose

$$EPE_{E2} = 0.65^\circ C$$

Con los cálculos realizados anteriormente se calcula un cambio de temperatura global del sistema teniendo en cuenta las elevaciones del punto de ebullición en la solución.

*Ecuación 28. Cambio de temperatura global del sistema*

$$\Delta T_G = T_s - T_{C3} - (EPE_{E1} + EPE_{E2} + EPE_{E3})$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

$$\Delta T_G = 121.1 - 51.67 - (0.36 + 0.65 + 2.45) = 65.97^\circ C$$

De acuerdo a Rangel se debe calcular el delta de temperatura en cada efecto los cuales son de manera aproximada a los inversos de los coeficientes globales de transferencia de calor U.

Ecuación 29. Cambio de temperatura en cada efecto.

$$\Delta T_N = \Delta T_G \frac{\left(\frac{1}{U_N}\right)}{\left(\sum 1/U_i\right)}$$

Fuente:(Rangel, Argoti 1999)

$$\Delta T_{C1} = 65.97 * \frac{\left(\frac{1}{3123}\right)}{\left(\frac{1}{3123} + \frac{1}{1987} + \frac{1}{1136}\right)} = 12.40^\circ C$$

$$\Delta T_{C2} = 19.50^\circ C$$

$$\Delta T_{C3} = 34.07^\circ C$$

Debido a que el método es iterativo, se debe realizar una corrección de temperaturas ya que por ejemplo en el primer efecto la alimentación entra fría, por ende, se requiere una cantidad de calor mayor, lo cual hace que el delta de temperatura tenga que elevarse, pero a su vez los demás tengan que disminuirse con el fin de compensar la elevación realizada en el primer efecto.

De esta forma se tiene:

$$\Delta T_{C1 \text{ corregida}} = 12.40 + 3.16 = 15.56^\circ C$$

$$\Delta T_{C2 \text{ corregida}} = 19.50 + 1.16 = 18.34^\circ C$$

$$\Delta T_{C3 \text{ corregida}} = 34.07 - 2 = 32.07^\circ C$$

Una vez son calculados los cambios de temperatura en cada efecto, se debe calcular los puntos de ebullición reales en cada efecto.

*Ecuación 30 Temperaturas de ebullición reales*

Efecto 1

$$T_n = T_s - \Delta T_{Cn \text{ Corregida}}$$

$$T_{C1} = T_s - \Delta T_{C1 \text{ Corregida}}$$

$$T_{C1} = 121.1 - 15.56 = 105.54^\circ C$$

Efecto 2

$$T_{C2} = T_{C1} - \Delta T_{C2 \text{ Corregida}} - EPE_{E1}$$

$$T_{C2} = 105.54 - 18.34 - 0.36 = 86.84^{\circ}\text{C}$$

$$T_{V2} = T_{C1} - EPE_{E1}$$

$$T_{V2} = 105.54 - 0.36 = 105.18^{\circ}\text{C}$$

Efecto 3

$$T_{C3} = T_{C2} - \Delta T_{C3 \text{ Corregida}} - EPE_{E2}$$

$$T_{C3} = 86.84 - 32.07 - 0.65 = 54.12^{\circ}\text{C}$$

$$T_{C3} = 86.84 - 0.65 = 86.112^{\circ}\text{C}$$

Puesto que la solución en estado líquido emergente del primer efecto se encuentra en su punto de saturación la temperatura del vapor de siguiente efecto corresponderá a la misma, pero en estado gaseoso debido a que la energía suministrada será igual al calor latente de ebullición para cambiar de fase.

Una vez se obtienen los anteriores valores se procede a calcular las capacidades caloríficas que tendrán las corrientes líquidas emergentes de cada evaporador para posteriormente realizar un balance de energía en donde se pueda conocer las cantidades producidas en cada evaporador.

Tomando la ecuación 24 y reemplazando por cada una de las fracciones molares de azúcar presentes en la solución tenemos:

$$C_p = 4.19 - 2.35 * X$$

$$C_{pF} = 4.19 - 2.35 * (0.1) = 3.955 \text{ kJ/kgK}$$

$$C_{pC1} = 3.869 \text{ kJ/kgK}$$

$$C_{pC2} = 3.684 \text{ kJ/kgK}$$

$$C_{pC3} = 3.015 \text{ kJ/kgK}$$

Utilizando una capacidad calorífica promedio del vapor igual a  $1.884 \text{ kJ/kgK}$  se calcula la entalpía del vapor con la siguiente ecuación:

*Ecuación 31. Entalpía de vapor*

$$H_n = H_{V_{n+1}} + 1.884 * (EPE_n)$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

los valores de entalpía de vapor saturado se buscan en tablas termodinámicas quedando de la siguiente manera:

$$H_{V1} = 2684 + 1.884 * (0.36) = 2685 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{V2} = 2654 + 1.884 * (0.65) = 2655 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{V3} = 2600 \text{ kJ/kg}$$

Para el cálculo del calor latente de condensación se usa la siguiente ecuación:

*Ecuación 32. Calor latente de condensación*

$$\lambda_{Vn} = H_{Vn} - H_{Cn}$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

$$\lambda_S = 2708 - 508 = 2220 \text{ kJ/kg}$$

$$\lambda_{V2} = 2244 \text{ kJ/kg}$$

$$\lambda_{V3} = 2294 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Reemplazando los valores de en la ecuación 16 tenemos:

$$F * C_{pF} * T_F + S * (\lambda_{VS}) = C_1 * C_{pC1} * T_{C1} + V_1 * H_{V1}$$

$$22680 * 3.955 * 26.7 + S * 2200 = C_1 * 3.869 * 105.54 + (22680 - C_1) * 2685$$

De igual forma, haciendo uso de la ecuación 17 concerniente al balance de energía en el segundo efecto y reemplazando las diferentes variables halladas tenemos:

$$C_1 * C_{pC1} * T_{C1} + V_1 * (\lambda_{V2}) = C_2 * C_{pC2} * T_{C2} + V_2 * H_{V2}$$

$$C_1 * 3.869 * 105.54 + (22680 - C_1) * 2244 = C_2 * 3.684 * 86.84 + (C_1 - C_2) * 2655$$

Haciendo uso de la ecuación 20 y reemplazando valores tenemos:

$$C_2 * C_{pC2} * T_{C2} + V_2 * (\lambda_{V3}) = C_3 * C_{pC3} * T_{C3} + V_3 * H_{V3}$$

$$C_2 * 3.684 * 86.84 + (C_1 - C_2) * 2294 = 4536 * 3.015 * 54.12 + (C_3 - 4536) * 2600$$

Al resolver de manera simultánea las ecuaciones 16,17 y 20 obtenemos los valores de las corrientes.

$$C_1 = 17078 \text{ kg/h}$$

$$C_2 = 11068 \text{ kg/h}$$

$$C_3 = 4536 \text{ kg/h}$$

$$V_1 = 5602 \text{ kg/h}$$

$$V_2 = 6010 \text{ kg/h}$$

$$V_3 = 6532 \text{ kg/h}$$

$$S = 8936 \text{ kg/h}$$

Posteriormente se deben calcular los requerimientos de calor para evaporar las cantidades de agua en cada efecto, esto se realiza con la siguiente ecuación:

*Ecuación 33. Requerimientos de calor para evaporación*

$$q_n = V_{n-1} * \lambda_{Vn}$$

$$q_3 = 3830 \text{ kW}$$

Por último, se deben calcular las áreas de transferencia de calor para cada efecto de tal manera que el área promedio no supere en ambos sentidos el 5% de error, si esto sucede se deben utilizar los valores calculados en el balance de energía de flujos para volver a realizar el balance de materia y así obtener las nuevas composiciones de sólidos en la corriente líquida emergente de cada evaporador.

*Ecuación 34. Área de transferencia de calor*

$$A_n = \frac{q_n}{U_n * \Delta T_{n \text{ corregido}}}$$

$$A_1 = \frac{5460 \times 10^3}{3123 * 15.56} = 112.4 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 95.8 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 105.1 \text{ m}^2$$

$$\bar{A} = 104.4 \text{ m}^2$$

*Ecuación 35. Porcentaje de error en áreas*

$$\%error_n = \left| \frac{A_n - \bar{A}}{A_n} \right| * 100$$

$$\%error_1 = \left| \frac{112.4 - 104.4}{112.4} \right| * 100 = 7.12\%$$

$$\%error_2 = 8.98\%$$

$$\%error_3 = 0.67\%$$

Al haber superado el % de error se procede a realizar de nuevo el balance de materia para determinar la cantidad de sólidos con la ecuación 13, 19 y 22

$$\frac{22680 * (0.1)}{17078} = 0.133 = X_1$$

$$X_2 = 0.205$$

$$X_3 = 0.5$$

Gracias al cambio en la composición de la solución, se deben recalculan las elevaciones del punto de ebullición con la ecuación 23

$$EPE_{E1} = 1.78 * (0.133) + 6.22 * (0.133)^2 = 0.35^\circ\text{C}$$

$$EPE_{E2} = 0.63^\circ\text{C}$$

$$EPE_{E3} = 2.45^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_G = 121.1 - 51.67 - (0.35 + 0.63 + 2.45) = 66^\circ\text{C}$$

Los nuevos cambios de temperatura en cada efecto se calculan de la siguiente manera:

*Ecuación 36. Cambio en la temperatura corregida*

$$\Delta T_{n \text{ corregida}} = \frac{\Delta T_{n \text{ corregida}} * A_n}{\bar{A}}$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p

$$\Delta T_{1 \text{ corregida}} = \frac{15.56 * 112.4}{104.4} = 16.77^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{2 \text{ corregida}} = 16.86^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{3 \text{ corregida}} = 32.34^\circ\text{C}$$

Con los anteriores cálculos se repiten cada uno de los pasos realizados obteniendo los siguientes valores.

$$T_S = 121.1^\circ\text{C}$$

$$T_{C1} = 104.33^\circ\text{C}$$

$$T_{C2} = 87.11^\circ\text{C}$$

$$T_{C3} = 54.12^\circ\text{C}$$

$$T_{V2} = 103.98^\circ\text{C}$$

$$T_{V3} = 86.48^\circ\text{C}$$

$$C_{pF} = 3.955 \text{kJ/kgK}$$

$$C_{pC1} = 3.877 \text{kJ/kgK}$$



$$C_{p\ C2} = 3.708\text{kJ/kgK}$$

$$C_{p\ C3} = 3.015\text{kJ/kgK}$$

Siguiendo con el recálculo de las diferentes propiedades debemos hacer lo mismo para las entalpías buscando en tablas termodinámicas con el fin de poder calcularlas y dando como resultado los siguientes datos.

$$H_{V1} = 2685\text{ kJ/kg}$$

$$H_{V2} = 2655\text{ kJ/kg}$$

$$H_{V3} = 2600\text{ kJ/kg}$$

$$\lambda_S = 2220\text{ kJ/kg}$$

$$\lambda_{V2} = 2244\text{ kJ/kg}$$

$$\lambda_{V3} = 2294\text{ kJ/kg}$$

Realizando nuevamente el balance de energía con el fin de encontrar el valor de las corrientes en cada etapa tenemos:

$$F * C_{p\ F} * T_F + S * (\lambda_{V\ S}) = C_1 * C_{p\ C1} * T_{C1} + V_1 * H_{V1}$$

$$22680 * 3.955 * 26.7 + F_{V\ E1} * 2200 = C_1 * 3.877 * 104.33 + (22680 - C_1) * 2683$$

$$C_1 * C_{p\ C1} * T_{C1} + V_1 * (\lambda_{V\ 2}) = C_2 * C_{p\ C2} * T_{C2} + V_2 * H_{V2}$$

$$C_1 * 3.877 * 104.33 + (22680 - C_1) * 2243 = C_2 * 3.708 * 87.11 + (C_1 - C_2) * 2655$$

$$C_2 * C_{p\ C2} * T_{C2} + V_2 * (\lambda_{V\ 3}) = C_3 * C_{p\ C3} * T_{C3} + V_3 * H_{V3}$$

$$C_2 * 3.708 * 87.11 + (C_1 - C_2) * 2293 = 4536 * 3.015 * 54.12 + (C_2 - 4536) * 2600$$

$$C_1 = 17005\text{kg/h}$$

$$C_2 = 10952\text{kg/h}$$

$$C_3 = 4536\text{kg/h}$$

$$H_{V1} = 5675\text{g/h}$$

$$H_{V2} = 6053\text{kg/h}$$

$$H_{V3} = 6416\text{kg/h}$$

$$S = 8960\text{ kg/h}$$

Una vez calculados los flujos en cada corriente se procede a calcular los requerimientos de calor para que el vapor cambie de fase e inmediatamente el área de transferencia de calor.

$$q_1 = 5476 \text{ kW}$$

$$q_2 = 3539 \text{ kW}$$

$$q_3 = 3855 \text{ kW}$$

$$A_1 = 104.6 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 105.6 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 104.9 \text{ m}^2$$

$$\bar{A} = 105 \text{ m}^2$$

$$\%error_1 = 0.38\%$$

$$\%error_2 = 0.568\%$$

$$\%error_3 = 0.095\%$$

Calculados los porcentajes de error con el ejercicio 8.5.1 del Geankoplis, vemos que no llegan al 1% indicando que esta solución es la correcta es por esto que se interrumpe el proceso iterativo.

En las siguientes tablas se compilan los resultados producto de los cálculos realizados.

*Tabla 7. Resultados Teóricos corrientes líquidas*

	Líquido 1	Líquido 2	Líquido 3
<b>Flujo másico kg/h</b>	17005	10952	4536
<b>Temperatura ° C</b>	104.33	87.11	54.12
<b>Composición %W H<sub>2</sub>O</b>	86.7	79.5	50
<b>Composición %W C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub></b>	13.3	20.5	50

Fuente: elaboración propia

Tabla 8. Resultados teóricos corrientes de vapor

	Vapor vivo	Vapor 1	Vapor 2
<b>Flujo másico kg/h</b>	8960	5675	6053
<b>Temperatura ° C</b>	121.33	105.4	86.48
<b>Q (kW)</b>	5476	3539	3855

Fuente: elaboración propi

### 3.2 SIMULACIÓN DE PROCESOS

Estudiosos del tema como H. Maisel y G. Gnugnoli definen simulación como “técnica numérica para realizar experimentos en una computadora digital, estos experimentos involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos o químicos a través de largos periodos de tiempo.”<sup>31</sup>

Un punto de vista más preciso es el dado por Robert E. Shannon “es el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir experimentos con este modelo con el propósito de entender el comportamiento del sistema o valorar varias estrategias con las cuales se puede operar el sistema.”

Realizando una integración de las anteriores definiciones se puede definir la simulación como la aplicación de un modelo con el objetivo de crear estrategias que ayuden a resolver un problema con el uso de un sistema computarizo que permita disminuir el tiempo de resolución del problema en cuestión.

3.2.1 Simulación estacionaria y dinámica. La simulación en estado estacionario implica resolver los balances de materia y energía sin tener en cuenta los cambios que las diferentes variables sufren a lo largo del tiempo; es por esto que se debe utilizar un sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales.

La simulación dinámica plantea todos los balances en su dependencia al tiempo, ya sea para simular el comportamiento de equipos batch o para analizar la evolución a lo largo del tiempo entre los dos estados estacionarios (arranque y parada) en una planta, además permite percibir el cambio en diferentes variables que logran hacer una alteración progresiva y con ello realizar un estudio más profundo de las mismas. Para el caso de la simulación dinámica el modelo matemático está constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias cuya variable diferencial es el tiempo. Caso contrario, se deberá resolver un sistema de ecuaciones diferenciales a derivadas parciales, abarcando tanto las coordenadas espaciales como la temporal.

### 3.3 SOFTWARE DE SIMULACIÓN

Diferentes trabajos han sido realizados utilizando gran variedad de software entre los que se destacan, Excel<sup>15</sup> que permite realizar el cálculo simplificado de la cantidad de vapor requerido para concentrar una solución, particularmente de NaOH-H<sub>2</sub>O, del mismo modo Franco<sup>5</sup> desarrollo una tesis de pregrado que consiste en un simulador para procesos de evaporación en la que utiliza el lenguaje de programación de Visual Basic para obtener tanto la cantidad de vapor como las dimensiones del equipo, para alrededor de 200 sustancias químicas.

Recientemente el software de simulación que se viene usando es Aspen Plus, Belghaieb<sup>39</sup> realiza la optimización a un tren de evaporación presente en una fábrica de ácido fosfórico la cual toma el agua que usa del mar y por medio de la evaporación la purifica y usa en el proceso de fabricación del ácido fosfórico. En dicho artículo se hace uso de la herramienta Desing Spec presente el software que permite mediante un proceso iterativo fijar una especificación al sistema modificando otra variable, en este caso el flujo de vapor requerido. Vazques<sup>44</sup> utiliza el mismo software de simulación para un sistema más complejo (sulfato de sodio, cloruro de sodio e hidróxido de sodio) en el que existen diferentes fases, es por esto que se debe operar vamos condiciones específicas que permiten realizar la concentración de las sustancias. La simulación se realizará en el programa llamado ASPEN Plus (sistema avanzado para la ingeniería de procesos), el cual es un simulador de procesos químicos que fue desarrollado por Aspen Tech en 1970 por investigadores de Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT).

Aspen Plus es un programa específico para la industria química el cual además de simulaciones de diagrama de flujos tiene la capacidad de realizar estimación de propiedades termodinámicas de los compuestos a usar, análisis de sensibilidad de variables de proceso, obtener especificaciones de diseño del equipo como el dimensionamiento y evaluar costos entre otras utilidades del simulador. Este programa contiene una gran base de datos con paquetes de fluidos que manejan toda la información que está relacionada con los componentes, sus propiedades físicas, parámetros de interacción, reacciones, entre otros, que se pueden encontrar en una sola unidad llamada "Component List" permitiendo así el fácil ingreso a la hora de simular. Existe otra parte del programa llamada "Simulation" en donde por medio de una interfaz gráfica y una paleta de modelos se pueden generar diagramas de procesos de flujo, que consiste básicamente en la introducción y especificación de datos, selección de equipos y operaciones necesarias para llevar a cabo la

---

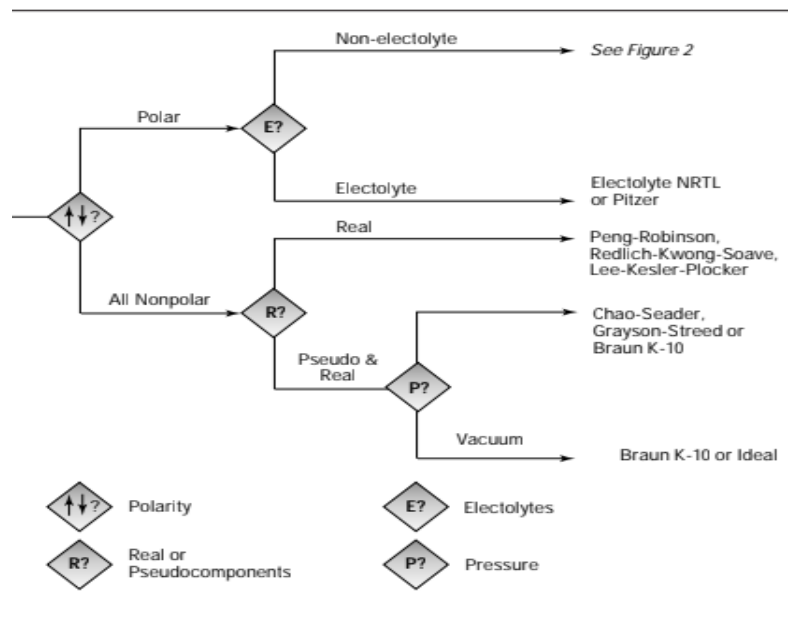
<sup>39</sup> BELGHAIEB, Jalel, et al. Simulation and Optimization of a Triple-Effect Distillation Unit. En: Energy and Environment Research Unit, National Engineering School of Gabes, Gabes University, Tunisia. p. 1-6

simulación. Aquí es donde el programa efectúa las operaciones necesarias para dar un estimado del sistema real del proceso con sus resultados.<sup>40</sup>

### 3.4 MODELO TERMODINÁMICO

Para la selección del modelo termodinámico que más se ajusta al fluido a trabajar en este caso una solución compuesta de agua y sacarosa, se emplean arboles de decisión como el enunciado en el artículo de Eric Carlson Don't Gamble With Physical Properties For Simulations<sup>41</sup>. En el que bajo criterios específicos como lo es la polaridad, el concepto de solución electrolítica y no electrolítica, se proponen algunos paquetes termodinámicos que son comúnmente utilizados. En la siguiente figura se muestra la sección de interés del árbol de selección presentado por Carlson.

*Figura 38. Selección método a partir de propiedades termodinámicas*



Fuente: CARLSON, Eric. Don't Gamble with Physical Properties for Simulations. CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS. Octubre de 1996. P. 36

<sup>40</sup> BETANCUR, LAURA y LANCHEROS, PAULA. Evaluación De Dos Alternativas Con Recuperación De Condensados

En El Tratamiento De Gas Natural Con Respecto Al Método Joule Thomson. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA, 2017. p. 55-58

<sup>41</sup> CARLSON, Eric. Don't Gamble With Physical Properties For Simulations. En: Succeeding at Simulation. Oct., p. 36

Para la correcta selección del paquete termodinámico se deben considerar 4 factores claves.

- La naturaleza de las propiedades de interés
- La composición de la mezcla
- La presión y el rango de temperaturas
- La disponibilidad de parámetros

Al hablar de naturaleza de las propiedades de interés se hace alusión a conceptos como lo son la polaridad y si es electrolítica o no la solución.

La primera definida como “propiedad de las moléculas que representa la separación o desigualdad de las cargas eléctricas dentro de la molécula, según el número y tipo de enlaces que posea”<sup>42</sup>.

Este concepto está directamente relacionado con la diferencia de electronegatividad presente en la molécula, la cual representa la capacidad de un átomo para atraer hacia si los electrones de un enlace químico, es por esto que se dice que una molécula es polar cuanto la diferencia de electronegatividad es superior a 0.4 según la escala de Pauling.<sup>43</sup>

Por otra parte, una solución es electrolítica cuando al hacer contacto con el agua los componentes presentes se disocian en iones, lo que produce que se pueda conducir corriente eléctrica.

La solución que será evaporada en el tren de evaporación adquirido con la Fundación Universidad de América será una compuesta por agua (H<sub>2</sub>O) y azúcar comercial (C<sub>12</sub>H<sub>22</sub>O<sub>11</sub>), para la selección de la simulación en la que se concentrara sacarosa, se evaluó el árbol de decisión propuesto por Carlson<sup>41</sup>, dicha disolución es polar ya que forman un enlace covalente polar en el que los electrones son compartidos de manera desigual por lo cual se nota ligeramente una distribución de cargas teniendo un lado cargado positivamente y uno negativamente, dicho fenómeno es conocido como cambio de dipolo. La solución es no electrolítica debido a que al hacer contacto con el agua no se disocia en iones. Siguiendo con el árbol de decisión, se evalúa la presión, al trabajar a presiones inferiores a los 10 bar se evalúa si habrá alguna fracción de vapor presente a la solución y puesto que el objetivo es evaporar la mayor cantidad de agua presente en la solución los mejores paquetes termodinámicos a utilizar serán Wilson, NRTL y UNIQUAC entre otros.

---

<sup>42</sup> CEDRÓN, J.; LANDA, V. y ROBLES, J. Polaridad de moléculas. [Consultado el jul 13,2018]. Disponible en: Pontificia Universidad Católica del Perú

<sup>43</sup> CHANG, Raymond y COLLEGE, Williams. Química. 7 ed. MÉXICO: McGRAW-HILL, 2002. p. 340-3410-07-365601-1

Gracias a este método empleado se utilizó un paquete de propiedades termodinámicas basadas en NRTL ya que no se poseen parámetro de interacción binaria entre los diferentes compuestos presentes en la disolución.

### 3.5 DESCRIPCION, ESPECIFICACIÓN DE CORRIENTES Y CONDICIONES DE ENTRADA

Para llevar a cabo la simulación planteada del proceso de concentración de sacarosa, se recurre al uso del simulador Aspen Plus. Los equipos usados en dicha simulación son principalmente dos, intercambiadores de calor y separadores flash. Los anteriores simulan de manera correcta un proceso de evaporación de solvente con el fin de concentrar la solución.

En los intercambiadores de calor se calcula de manera precisa la energía requerida para realizar la evaporación, partiendo de una cantidad supuesta de vapor proveniente de una caldera, el cual únicamente cambiará de fase hasta líquido saturado, el calor liberado, producto de la entalpía de vaporización es el usado en el siguiente equipo, un separador flash en el que ingresa la solución a concentrar juntos con la energía calculada anteriormente.

La función de este separador radica en la separación de las fases presenten en la mezcla producto del intercambio de energía, por cimbras saldrá el vapor de agua que fue removido y por fondos una solución un poco más concentrada que la ingresada al sistema.

Con el fin de modelar un tren de evaporación en el cual se hace uso de la energía que posee cada una de las corrientes de cimbras, se ingresan una serie de intercambiadores de calor para que estos provean la energía requerida para realizar las siguientes evaporaciones hasta llegar a la especificación de concentración de la solución requerida.

Numerosos trabajos realizan el proceso de simulación utilizando los equipos mencionados anteriormente, como los vistos en Vazquez<sup>44</sup>, Chen<sup>45</sup>, Song<sup>46</sup> y Belghaieb<sup>47</sup> entre otros. Para la concentración de una solución azucarada que contiene 10% en peso de sacarosa en un evaporador de múltiple efecto (tres

---

<sup>44</sup> VAZQUEZ-ROJAS, Raul A.; GARFIAS-VÁSQUEZ, Francisco J. y BAZUA-RUEDA, Enrique R. Simulation of a triple effect evaporator of a solution of caustic soda, sodium chloride, and sodium sulfate using Aspen Plus. En: Computers and Chemical Engineering. Apr 6. vol. 112, p. 265-273

<sup>45</sup> CHEN, Chau-Chyun y SONG, Yuhua. Generalized electrolyte-NRTL model for mixed-solvent electrolyte systems. En: AIChE Journal. -08-01. vol. 50, no. 8, p. 1928-1941

<sup>46</sup> SONG, Yuhua y CHEN, Chau-Chyun. Symmetric Electrolyte Nonrandom Two-Liquid Activity Coefficient Model. En: Industrial & Engineering Chemistry Research. August 19. vol. 48, no. 16, p. 7788-7797

<sup>47</sup> BELGHAIEB, Jalel, et al. Simulation and Optimization of a Triple-Effect Distillation Unit. En: Energy and Environment Research Unit, National Engineering School of Gabes, Gabes University, Tunisia. p. 1-6

efectos) hasta llevarla a una concentración del 50% en peso, se enuncian los parámetros proporcionados por el ejemplo 8.5-1 de Geankoplis<sup>48</sup>, los cuales son presentados en la siguiente tabla 6.

### 3.5.1 Proceso de simulación.

*Tabla 9 Parámetros de entrada al simulador*

Datos de entrada al simulador			
Alimento		Vapor de H <sub>2</sub> O saturado	
Flujo másico (kg/h)	22680	Presión (kPa)	205.5
Composición inicial (%W azúcar)	10	Temperatura (°C)	121.1
Temperatura inicial (°C)	26.7	efecto 3	
Composición final (%W azúcar)	50	Presión (kPa)	13.4
Temperatura evaporador 1 (°C)	105.54	Temperatura (°C)	51.67
Temperatura evaporadora 2 (°C)	86.84		

Fuente: elaboración propia

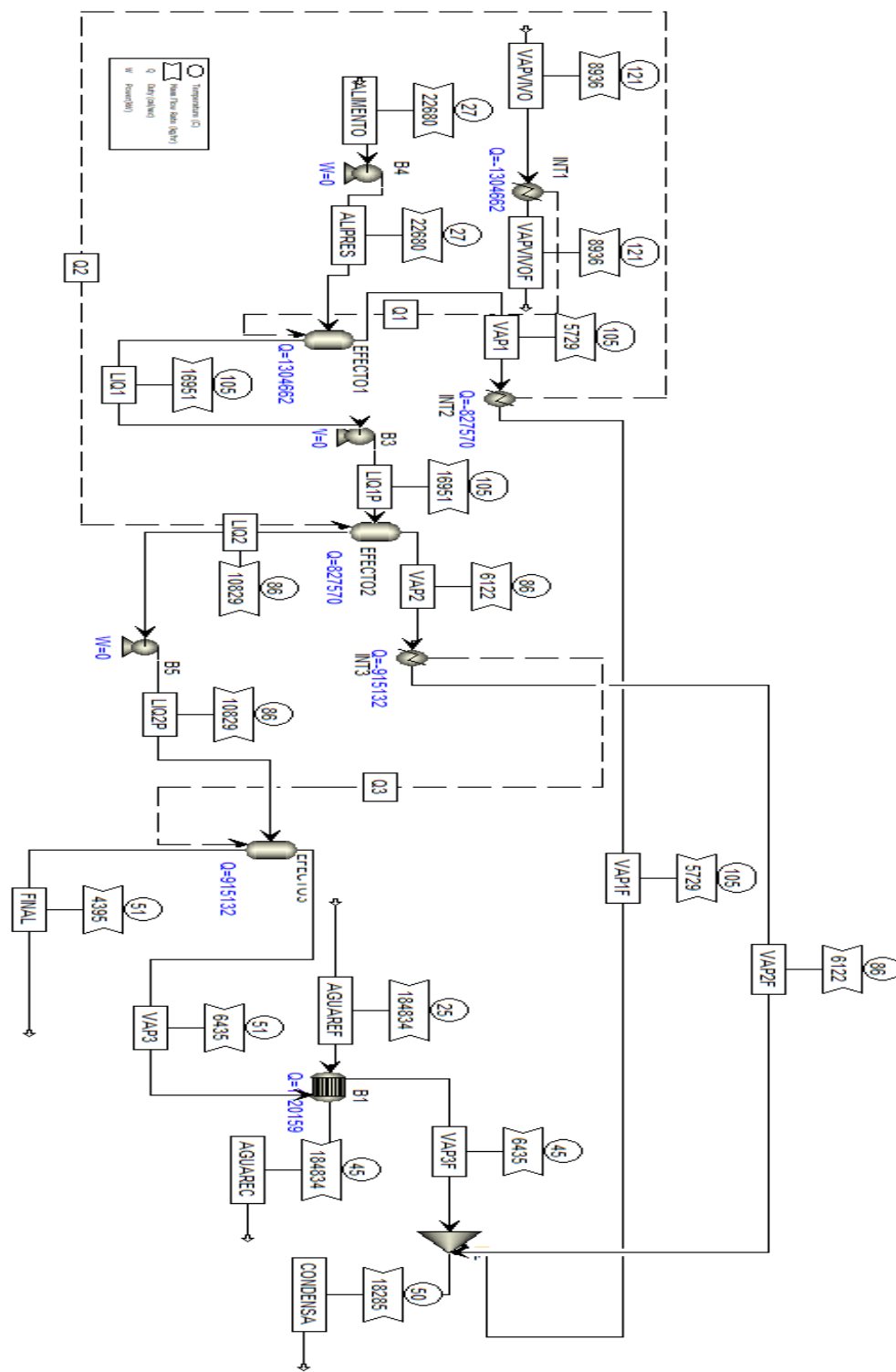
Cantidad de alimento al evaporador junto con su composición y temperatura; cada una de las variables son conocidas antes de ser ingresadas al proceso de evaporación. Composición de salida del efluente líquido del ultimo efecto; este parámetro es una especificación que se debe proporcionar al modelo ya que es a lo que queremos llegar en composición, además, se debe especificar la temperatura o la presión a la que trabajará el evaporador en el último efecto que por lo general es la presión atmosférica.

Se deben especificar las temperaturas a las que trabajaran cada uno de los evaporadores y, por último, la composición del efluente líquido del primer efecto. Se debe utilizar un ajustador de variables con el fin de garantizar la composición requerida en el producto, esto se logra controlando el flujo másico de vapor vivo que ingresa al sistema ya que este es el que proporciona la energía para evaporar el agua presente en la solución por medio del intercambio de calor entre la corriente caliente y la corriente fría. Para hacer más rigurosa la simulación se instalaron las bombas que en la vida real se encuentran en el tren de evaporación con el fin de poder hacer el cambio de presión entre los evaporadores. En la figura 39 se muestra el esquema final de la simulación.

<sup>48</sup> Geankoplis. Op. cit., p. .563



Figura 39. Esquema tren de evaporación en Aspen Plus



Fuente: Elaboración propia.

La descripción de cómo se realizó la simulación se encuentra en un video explicativo el cual debe ser solicitado al grupo de métodos de separación no convencionales de la Fundación Universidad de América.

### 3.6 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

De acuerdo a la simulación realizada se puede observar que el simulador ASPEN PLUS realiza los cálculos desarrollados manualmente, teniendo en cuenta cada una de las perturbaciones, como lo es la elevación del punto de ebullición de la solución producto del aumento en la cantidad de material a concentrar, además de arrojar las temperaturas corregidas de cada una de las corrientes presentes en el tren de evaporación a fin de lograr la especificación dada de 50% de azúcar al final del proceso.

A continuación, se presenta la tabla en la que se consignaron los datos calculados por el simulador.

*Tabla 10. Resultados simulación corrientes líquidas*

	Líquido 1	Líquido 2	Líquido 3
Flujo másico kg/h	17071.7	10967.8	4556.3
Temperatura ° C	105.40	86.48	51.12
Presión Atm	1.1981	0.5962	0.1225
Composición %W H <sub>2</sub> O	86.7149	79.3945	49.6164
Composición %W C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	13.2851	20.6055	50.3836

Fuente: elaboración propia.

*Tabla 11. Resultados simulación corrientes de vapor*

	Vapor vivo	Vapor 1	Vapor 2	Vapor 3
Flujo másico kg/h	8987.83	5608.33	6064.91	6466.16
Temperatura ° C	121.33	105.4	86.48	51.12
Presión Atm	2.03	1.20	0.60	0.12
Q kW	5494.04	3496.36	3867.07	4276.94

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos y comparándolos con los datos producto de la solución teórica, se presenta la siguiente tabla el % de error existente:

*Tabla 12. % de error para las corrientes líquidas*

%ERROR CORRIENTES LIQUIDAS			
Corriente	flujo másico	x H <sub>2</sub> O	Temperatura
1	0.3920	0.0170	1.050
2	0.1424	0.1327	0.723
3	0.4479	0.7672	5.540

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, el % de error para las variables de flujo másico y composición de agua en cada corriente no supera el 1%, esto se da gracias al uso más preciso del cálculo de la capacidad calorífica de la solución utilizando bases de datos actualizadas que posee el simulador y no rigiéndonos por una ecuación la cual linealiza el comportamiento de la variable.

Por otra parte, el cálculo del cambio de temperatura en cada efecto se realiza mediante una aproximación en la cual se tiene en cuenta el coeficiente global de transferencia de calor que es calculado de manera experimental, teniendo en cuenta la resistencia a la transferencia de calor por convención, conducción y radiación pero para este caso no se puede especificar, por lo cual es un parámetro calculado directamente por el simulador, lo que hace que las temperaturas en cada efecto fluctúen con respecto a las teóricas, habiendo un error máximo igual al 3%.

*Tabla 13. % de error para las corrientes de vapor*

% ERROR CORRIENTES DE VAPOR.		
Corriente	flujo másico	Q
Vivo	0.3106	0.3294
1	1.1748	1.2050
2	0.1968	0.3131

Fuente: Elaboración propia

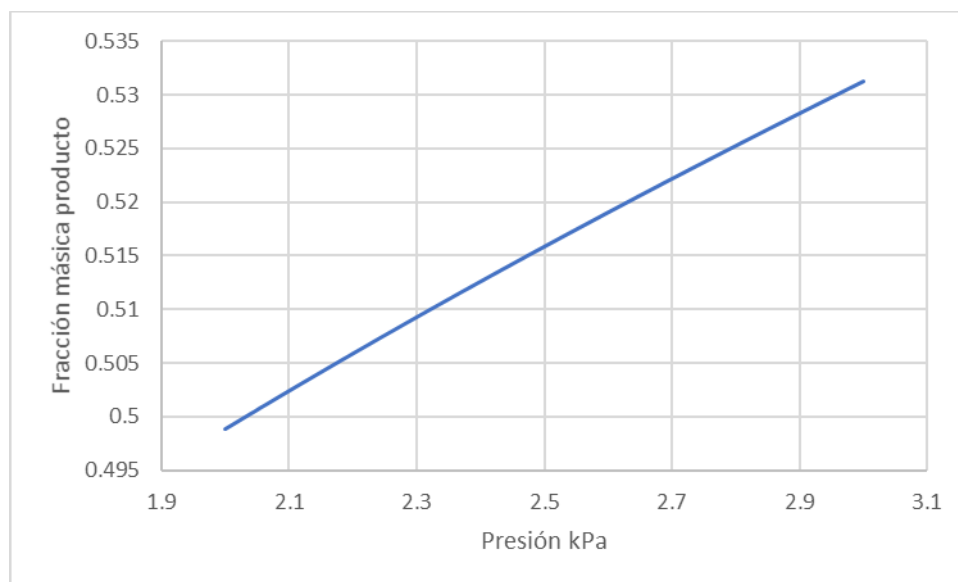
Al suministrar mayor cantidad de energía a la solución las composiciones en la fase líquida se van a distribuir diferente, por ende, los flujos de vapor producido en cada efecto cambiarán llegando a un % de error que no superan el 2% lo cual a su vez impacta de manera directa en la cantidad de calor que este cederá a la corriente de líquido.

### 3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los datos obtenidos con ayuda del simulador Aspen Plus usando la herramienta Model Analysis Tools, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de conocer el efecto que tiene cada una de las siguientes en el producto terminado (fracción de sacarosa en el producto concentrado), estas son: presión de vapor vivo, temperatura del alimento, presión y temperatura en los evaporadores.

3.7.1 Efecto del aumento en la presión del vapor vivo. Aumentar la presión del vapor vivo conlleva a aumentar la temperatura del mismo y por ende a aumentar la fracción másica del producto disminuyendo así la cantidad de vapor vivo que se requiere para llegar a la concentración deseada. En la gráfica 1 se observa se puede observar el efecto producido al incrementar en 100 kPa.

*Gráfico 1. Efecto del aumento de la presión de vapor vivo en la composición del producto*



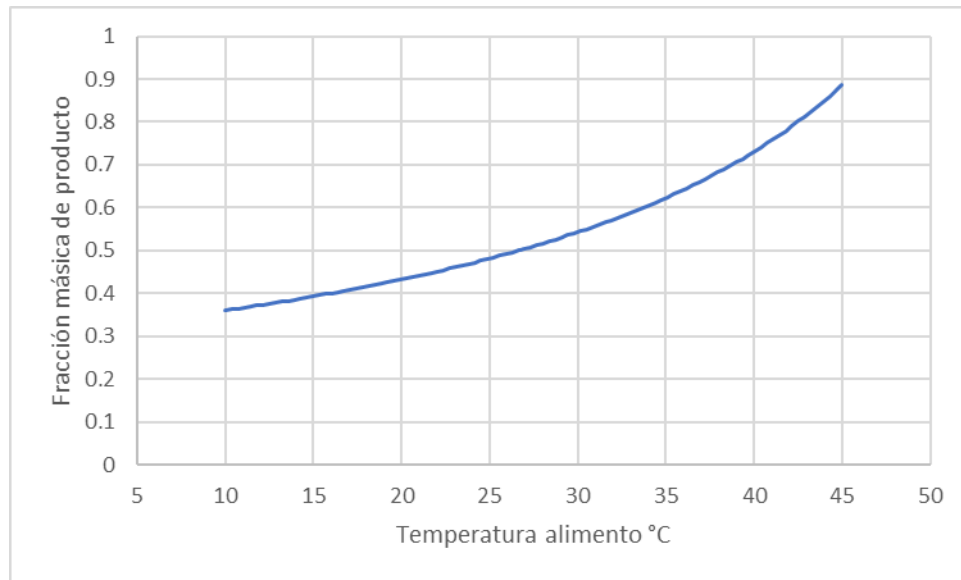
Fuente: elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede observar que el cambio no representa un aumento considerable en la fracción másica del producto e impacta en los costos de operación del evaporador ya que se debe utilizar más combustible en la caldera para alcanzar dicha temperatura o presurizar dicha línea con el fin de realizar el aumento en la presión, es por esto que no debería ser tomada como una opción a tener en cuenta para realizar futuras optimizaciones del proceso.

3.7.2 Efecto del aumento en la temperatura del alimento. Como se puede observar en el gráfico 2, el efecto de aumentar la temperatura del alimento es significativo ya que se observa cómo se incrementa la calidad del producto incluso utilizando la misma cantidad de vapor vivo a fracciones másicas de 0,9 de sacarosa. Esto se

debe a la disminución de la cantidad de energía (calor sensible) que debe aportar el vapor vivo para lograr que cambie de fase el producto. Un aumento de temperatura de 10°C pasando de 30 a 40°C hace que la fracción másica del producto aumente en un 30%.

*Gráfico 2. Efecto del aumento de la temperatura del alimento en la composición del producto*



Fuente: elaboración propia

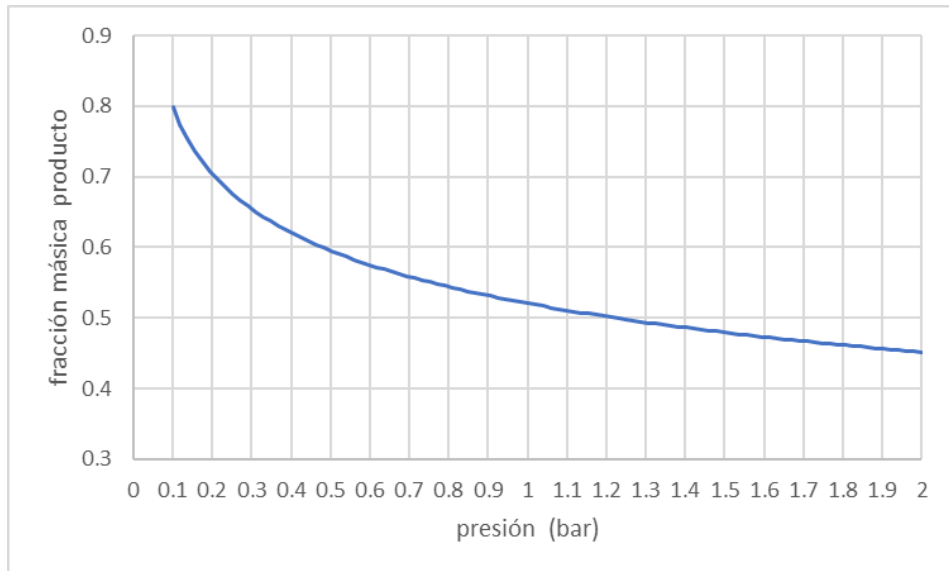
Este proceso se puede ejecutar en el tren de evaporación de la Fundación Universidad de América realizado un proceso de integración energética como el mencionado por Mesfun<sup>49</sup> en el que se aprovechan las corrientes calientes del proceso de producción de papel para precalentar el alimento al tren de evaporación. Particularmente en el proceso de evaporación de cualquier sustancia realizado en el tren de evaporación adquirido por la universidad habrá una corriente de vapor que debe ser enfriada mediante agua de servicio en un intercambiador de calor, haciendo que esta energía no sea aprovechada, sí se diseñara un intercambiador de calor en el que se aprovechara dicha energía, se precalentaría la solución y el consumo de vapor vivo disminuiría obteniendo el producto a la concentración deseada.

3.7.3 Efecto de la disminución de presión en los evaporadores. La presión a la cual se trabajan los evaporadores juega un papel fundamental en el punto de ebullición de la sustancia a concentrar, ya que al disminuir la misma el punto de ebullición baja y por ende la cantidad removida de solvente en cada efecto aumenta. En la gráfica

<sup>49</sup> MESFUN, Sennai y TOFFOLO, Andrea. Optimization of process integration in a Kraft pulp and paper mill – Evaporation train and CHP system. En: Applied Energy. Jul. vol. 107, p. 98-110

3 se observa el efecto que la presión tiene sobre la composición final del producto, en este caso se trabaja con la presión en el primer efecto.

*Gráfico 3. Efecto de la disminución de la presión en los evaporadores sobre la concentración del producto*



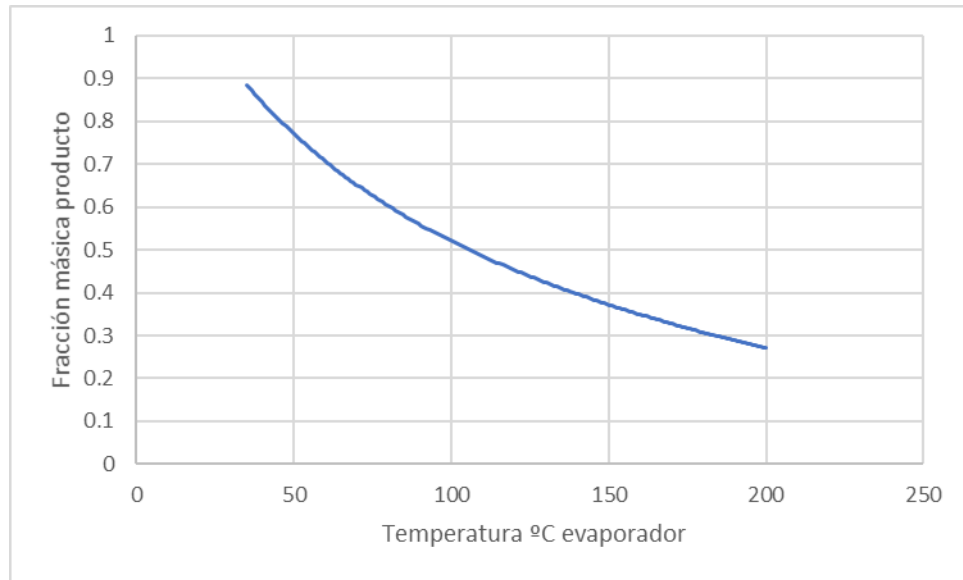
Fuente: elaboración propia

El punto de ebullición se produce cuando la presión de vapor iguala a la presión atmosférica, es decir cuando las moléculas que se encuentran en la superficie de la solución adquieren la suficiente energía cinética para vencer la presión ejercida por la atmosfera. Al disminuir la presión del sistema, la fuerza que debe vencer el fluido se hace mucho más pequeña causando así que la temperatura de ebullición sea más baja. Es por esto que al trabajar a bajar presiones (vacío) se logra aumentar la concentración final del producto.

3.7.4 Efecto del aumento en la temperatura del primer evaporador. La temperatura del evaporador es un parámetro que puede ser modificado a conveniencia del proceso de la misma forma que la presión, es por esto que al trabajar a menor temperatura de ebullición la concentración final aumentara de acuerdo a lo expuesto en la sección 3.5.2.

En la gráfica 4 se aprecia el comportamiento de la fracción másica cambiando la temperatura del evaporador.

Gráfico 4. Efecto de temperatura de operación del evaporador en la fracción másica del producto



Fuente: elaboración propia

## 4.GUÍA PLANTA PILOTO TREN DE EVAPORACIÓN

La guía de laboratorio de la planta piloto de evaporación se realizó con base en los documentos proporcionados por el fabricante en donde se proponen un total de 6 prácticas en las cuales se ejemplifica los diferentes usos que pueden dársele al tren de evaporación. Para efectos prácticos en el documento de grado serán propuestas 2 guías de laboratorio, las cuales están diseñadas con el propósito de dar a conocer al estudiante el funcionamiento de la evaporación como operación unitaria haciendo uso de un evaporador de chaqueta. La segunda guía de laboratorio mostrará la robustez del equipo adquirido por la Fundación Universidad de América operando el tren de evaporación de triple efecto con alimentación hacia adelante.

La no realización de las 6 prácticas de laboratorio radica principalmente en temas de tiempo para la realización de las prácticas por los estudiantes ya que, según el fabricante, cada práctica dura al menos 6 horas en culminarse.

Por otra parte, el uso del tren de evaporación es muy similar en sus diferentes configuraciones, basta con ajustar una serie de válvulas, para operar el sistema a su conveniencia, es por esto que se deciden escoger 2 prácticas únicamente en las cuales los estudiantes conozcan, manipulen y se apropien del tren de evaporación, para lo último se propone hacer una actividad envolvente que consiste un juego de roles, apersonándose del papel asignado.

### 4.1 GUÍA INTRODUCTORIA AL MANEJO TREN EVAPORACIÓN

Esta guía tiene como objetivo realizar una primera aproximación al tren de evaporación conociendo los diferentes conceptos, normas, precauciones y protocolos que debe tener en cuenta los estudiantes al momento de ingresar al área de trabajo

4.1.1 Implementos. Toda persona que desee ingresar a la zona en la cual se encuentra instalada la planta piloto de evaporación de deben tener los siguientes implementos siendo estos de carácter obligatorio.

- Overol de manga larga
- Gafas de seguridad
- Guantes de Nitrilo
- Guantes de carnaza
- Zapatos cerrados o botas
- Bitácora de laboratorio



4.1.2 Costo de la práctica. Los costos de la práctica radican en la cantidad de vapor vivo que debe ser suministrado al tren de evaporación y este se calculó de manera aproximada realizando la simulación del proceso de concentración de 40 kg/h de una solución que contiene una fracción másica de 0.1 de sacarosa y el objetivo de la misma es concentrarla has 0.5.

De acuerdo a la simulación realizada se obtiene que se requieren 16.03 kg/h de vapor saturado a 100°C. Esta cantidad de vapor debe ser producido en una caldera que trabaja con gas natural como fuente de energía, si se asume que el agua que entra a la caldera se encuentra a 18°C y 540 mmHg se necesitan  $12900.1 \frac{J}{s}$  de energía para cumplir con los requerimientos del tren de evaporación.

Esta cantidad de energía debe ser suministrada en la caldera por el combustible que será consumido, en este caso gas natural, la cual posee un poder calorífico de 47 MJ/kg. Como el proceso no es ideal se debe tener en cuenta la eficiencia de la caldera que en este caso es 0.8, así pues, la cantidad en litros de gasolina es:

*Ecuación 37. Cantidad de gasolina requerida para el proceso de evaporación*

$$12900.1 \frac{J}{s} * \frac{1 \text{ kg Gas natural}}{47 \times 10^6 J} * \frac{1}{0.8} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * 8 \text{ h} * \frac{1 \text{ m}^3}{0.737 \text{ kg}} = 1.68 \text{ m}^3 \text{ gas natural}$$

Fuente: elaboración propia

De acuerdo gas natural fenosa el gas natural tiene un valor de 1593.36 \$/galón lo que traduce en \$706419 el costo de la práctica de laboratorio.

Por otra parte, se debe realizar un estimado de la cantidad de energía eléctrica que se debe suministrar al sistema por concepto de bombas. Gracias al uso de Software de simulación Aspen Plus la cantidad de energía suministrada es calculada por el mismo y es 1.3545 kW

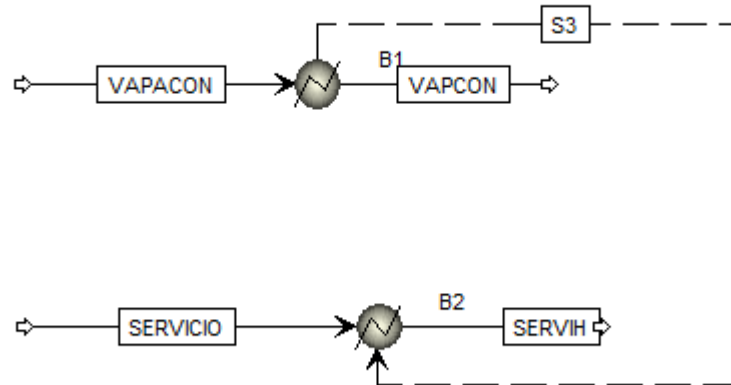
*Ecuación 38. Costo energía eléctrica*

$$1.3545 \text{ kW} * \frac{629.2 \$}{1 \text{ kWh}} * 8 \text{ h} = \$6800$$

De acuerdo a los cálculos realizados el costo total de la práctica de laboratorio en consumo de energía es \$713218.

En cuanto a los costos de agua de servicio requerida se hace uso del Software Aspen plus en el que se calcula la cantidad de agua a partir de los requerimientos a los que desean llegar, en este caso que el vapor generado en el último efecto sea condensado en su totalidad y a su vez este tenga una temperatura de 30°C usando agua de servicio que entra a 18°C y emerge a 25°C, realizando los cálculos respectivos en el simulador se obtiene que se necesitan 960kg/h de agua de servicio. En la siguiente figura 27 se muestra el esquema montado en aspen plus.

Figura 40. Esquema para cálculo de agua de servicio



Fuente: elaboración propia

La corriente denominada VAPACOND se refiere a la corriente de vapor generada en el tercer efecto, VAPCON es el vapor condensado, S3 hace referencia a la cantidad de energía que debe ser liberada para lograr los requerimientos. Por otra parte, la corriente SERVICIO representa la corriente de agua de servicio y SERVIH representa el agua de servicio caliente.

De acuerdo con el acueducto de Bogotá el metro cubico de agua cuesta \$3927.45 es por esto que se presenta el costo del agua de servicio a continuación.

*Ecuación 39. Costo agua de servicio*

$$960 \frac{kg}{h} * \frac{1}{1000} \frac{m^3}{kg} * 3927.45 \frac{\$}{m^3} * 1h = \$3771$$

Gracias al anterior cálculo se calculó el costo total de la práctica el cual asciende a \$ 726489.

4.1.3 Normas de seguridad en el laboratorio. Estas normas se realizaron basándose en las propuestas por el fabricante, a continuación, se presentan un total de 10 normas que deben ser seguidas a cabalidad para evitar posibles accidentes.

- Reconocer la ubicación de los elementos de seguridad que se encuentran a su disposición.
- Salidas de emergencia
- Lavaojos, duchas, extintores, botiquín, entre otros.
- Lugar destinado para la recolección de residuos.

- Está prohibido fumar, comer o beber en la planta piloto.
- Se debe tener orden en el lugar de trabajo para evitar accidentes.
- Durante su permanencia en la planta piloto deberá portar todo el tiempo los elementos de seguridad y llevar el pelo recogido, en caso de ser largo.
- En el área delimitada para la práctica de laboratorio no se debe dejar ningún tipo de elemento ajeno a la práctica como lo son: mochilas, abrigos, bolsos entre otros.
- Por ninguna razón se debe llevar a la boca o inhalar los productos químicos que se utilicen durante la práctica.
- Si accidentalmente se vierte un producto químico se debe actuar inmediatamente informando al profesor o jefe de laboratorio.
- En la preparación de disoluciones debe agitarse de modo suave y controlado para evitar salpicaduras.
- Los reactivos que sean volátiles o que en su mezclado generen vapores se deben manipular en la cámara de extracción.
- Si no se conoce la naturaleza de un producto químico o su información no es fiable, se debe suponer que es tóxico e inflamable, manteniéndolo alejado de las llamas y realizando su disposición correctamente.

4.1.4 Señalización y demarcación de áreas de trabajo. Durante la operación de un laboratorio el cual hace las veces de ambiente de trabajo se ponen en peligro constante la integridad física de las personas que laboran en el sitio debido a esto, la señalización del área de trabajo es un tema que cobra gran relevancia ya que gracias al conocimiento de las mismas se puede disminuir el riesgo al mínimo.

La señalización del lugar de trabajo, corresponde a una clasificación o lenguaje universal que pretende sean entendidas de forma rápida cualquier persona sin importar su condición intelectual o formación profesional o técnica la información que contengan la señal. En Colombia el Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec) es el encargado de regular este tema.

La norma NTC 1461<sup>50</sup> referente al higiene y seguridad. Colores y señales de seguridad establece los colores y señales de seguridad que deben ser utilizados

---

<sup>50</sup> NTC 1461:1987, HIGIENE Y SEGURIDAD. COLORES Y SEÑALES DE SEGURIDAD

para la prevención de accidentes y riesgos contra la salud y situaciones de emergencia.

El significado de los colores presentes en la señal se presenta a continuación.

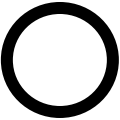


Tabla 14. Significado de colores en las señales

Color de seguridad/ contraste	de	Significado u objeto	Ejemplos de uso
Rojo	Blanco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pare</li> <li>• Prohibición</li> <li>• Prevención del fuego, equipo contra incendios y ubicación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Señales de pare</li> <li>• Paradas de emergencia</li> <li>• Señales de prohibición</li> </ul>
Azul	Blanco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acción de mando</li> <li>• Color de seguridad solo cuando se usa en forma circular</li> </ul>	Obligación a vestir equipos de protección personal
Amarillo	Negro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Precaución, riesgo de peligro</li> </ul>	Indicaciones de peligro (fuego, explosión, radiación, intoxicación) prevención de escalones hacia arriba o hacia abajo, obstáculos.
Verde	Blanco	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condición de seguridad</li> </ul>	Salidas de emergencia, estaciones de primeros auxilios y rescate.

Fuente. NTC 1461:1987, HIGIENE Y SEGURIDAD. COLORES Y SEÑALES DE SEGURIDAD

Así como cada color tiene un objetivo específico, la forma geométrica también tiene un significado en específico, en la siguiente tabla se presenta el significado correspondiente.

Figura 41. Identificación de forma geométrica en las señales<sup>51</sup>







Forma geométrica	Significado
	Prohibición o acción de mando
	Prevención
	Información (incluyendo instrucciones)

Fuente. NTC 1461:1987, HIGIENE Y SEGURIDAD. COLORES Y SEÑALES DE SEGURIDAD





De acuerdo a las anteriores convenciones mostradas se realizó la selección de las señales que deben estar presentes en el sitio que será adecuado para la instalación del tren de evaporación.

<p><i>Figura 42. Peligro de explosión</i></p> 	<p><i>Figura 43. Riesgo eléctrico</i></p> 	<p><i>Figura 44. Superficie caliente</i></p> 	<p><i>Figura 45. Riesgo de caída de objetos</i></p> 
---	---	---	---

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

<p>Figura 46. Lavaojos de emergencia</p> 	<p>Figura 47. Ducha de emergencia</p> 	<p>Figura 48. Primeros auxilios</p> 	<p>Figura 49. Ruta de salida</p> 
<p>Figura 50. Ruta de evacuación</p> 	<p>Figura 51. Salida de emergencia</p> 		

Fuente: Gestión Calidad Consulting. Legalización de Riesgos Laborales como prevención. [0]. Sep 5,. [Consultado el Nov 29,2018]. Disponible en: <http://gestion-calidad.com/senalizacion-riesgos-laborales>

<p>Figura 52. Uso obligatorio de guantes</p> 	<p>Figura 53. Uso obligatorio de tapabocas</p> 	<p>Figura 54. Uso obligatorio de overol</p> 	<p>Figura 55. Uso obligatorio de guantes</p> 
--	--	--	--

Fuente: SYDSA, Productos para Identificación. Uso Obligatorio del Siguiete Equipo: Lentes, Tapones, Guantes y Zapato. [0]. [Consultado el nov 29,2018]. Disponible en: <http://sydsa.com/store/s2b25-4-uso-obligatorio-del-siguiente-equipo-lentes-tapones-guantes-y-zapato.html>

4.1.5 Identificación de tuberías y servicios. En la norma NTC 3458<sup>51</sup> expedida Instituto Colombiano de Normas Técnicas (Icontec) se deben especificar los colores para la identificación de tuberías que transportan fluidos en las instalaciones.

Tabla 15. Identificación de tuberías

Color	Contenido del tubo
Verde	Agua
Gris	Vapor
Marrón	Aceites (mineral, vegetal o animal)
Amarillo	Gases (en condición gaseosa o licuada) excepto aire
Purpura	Ácidos y álcalis
Azul	Aire
Negro	Otros líquidos
Naranja	Servicios eléctricos y conductos de ventilación

Fuente. NTC 3458:1992, HIGIENE Y SEGURIDAD. IDENTIFICACIÓN DE TUBERÍAS Y SERVICIOS

4.1.6 Precauciones al momento de operar el equipo. Según el fabricante se deben tener en cuenta los siguientes aspectos a la hora de operar el equipo:

- Debido a la robustez del equipo se requiere como mínimo dos personas para la operación, permitiendo una asistencia mutua para evitar accidentes, realizar simultáneamente toma de datos de diferentes variables y poder realizar relevos durante el proceso.
- Siempre se debe informar al responsable del equipo (docente o encargado de laboratorios) el arranque del mismo.
- Situar el equipo en una zona ventilada debido a la posible acumulación de vapores de solventes con el fin de no generar atmosferas inflamables o asfixiantes.

<sup>51</sup> NTC 3458:1992, HIGIENE Y SEGURIDAD. IDENTIFICACIÓN DE TUBERÍAS Y SERVICIOS

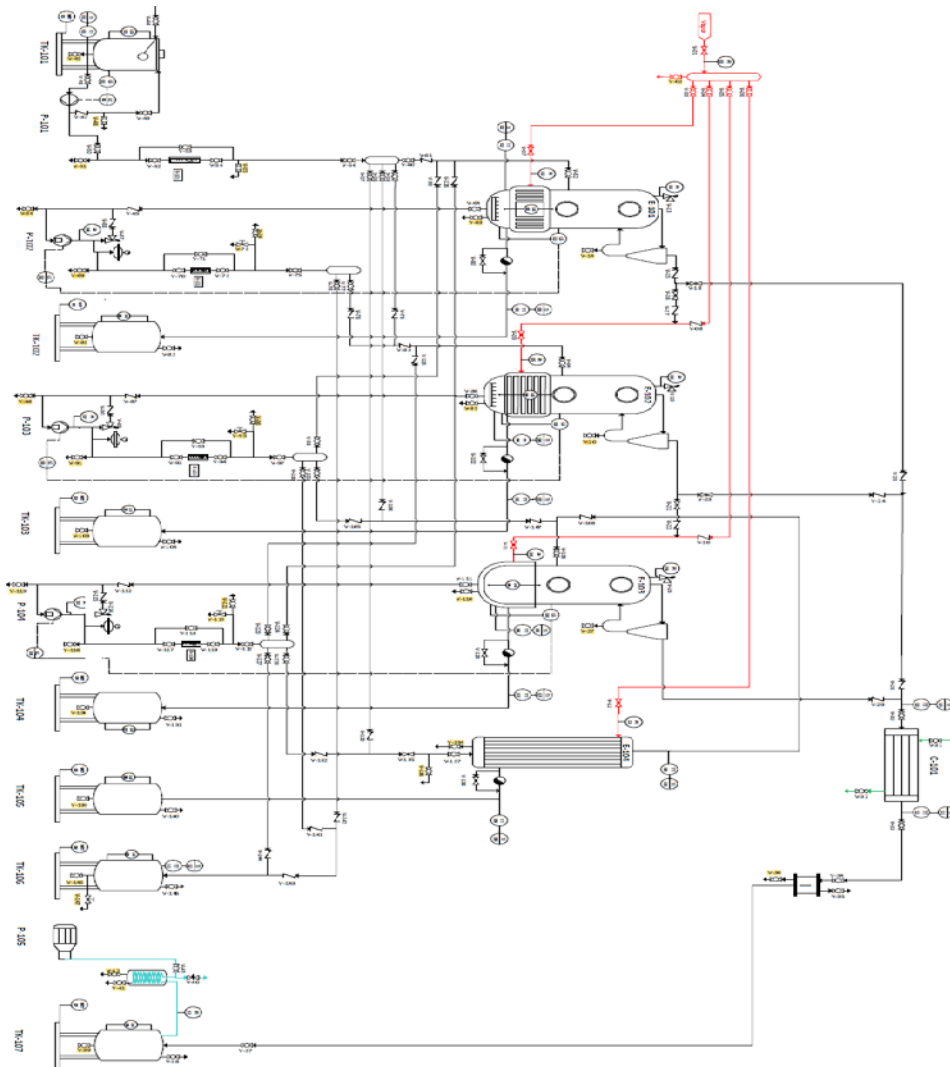
- Tener al alcance en un lugar visible y despejado botiquín de primeros auxilios y extintor de fuego.
- No alejarse del equipo por más de 15 min, si es necesario informar al encargado y al relevo. Los estudiantes no deben permanecer por más de 8 horas ejecutando labores en el tren de evaporación.
- Por ningún motivo se debe permitir el acceso a personal no autorizado a la caja eléctrica del equipo.
- Se debe garantizar la alimentación constante de agua de refrigeración, si durante el proceso es interrumpida el flujo se debe suspender inmediatamente la operación.
- Al realizar el descargue del sistema, se debe dejar que el equipo se enfríe hasta una temperatura de 35°C evitando así accidentes.
- Siempre se debe realizar limpieza e los equipos una vez terminada la operación, evitando la acumulación del material que pueda causar corrosión y la contaminación de otros productos.
- Al momento de realizar el descargue del sistema, se debe contar con los siguientes implementos con el fin de disminuir la probabilidad de accidente
  - Overol
  - Guantes de carnaza
  - Pechera de carnaza
  - Botas de seguridad
- Los tanques que contienen la solución concentrada y el solvente recolectado siempre deben ser vaciados una vez terminada la operación en recipientes de material inerte para evitar desnaturalización.
- Realizar mantenimiento preventivo y correctivo de la unidad de proceso. Ajustar las tuberías que presenten fugas o goteos, cambiar el empaque presente entre el tanque y la tapa cuando se requiera, limpiar frecuentemente los equipos por acumulación de polvo o materiales extraños, mantener limpia y aseada el área de operación y el tablero de control.
- Si se presentan escapes o fugas, remediarlas cuando sea posible con las herramientas disponibles. Si la magnitud de la fuga es grande detener la operación y dejar enfriar para poder resolver el problema con seguridad.
- No permita que entre líquido a la bomba de vacío.



## 4.2 ARRANQUE DEL EQUIPO

4.2.1 Protocolo de operación del tren de evaporación. Asegurar que las válvulas de purga y toma muestras presentes en el tren de evaporación se encuentren limpias y sin obstrucciones, posteriormente se deben cerrar. (V-02, V-14, V-20, V-27, V-36, V-39, V-41, V-42, V-45, V-48, V-51, V-55, V-63, V-63, V-66, V-69, V-73, V-74, V-81, V-85, V-88, V-91, V-95, V-96, V-103, V-110, V113, V-116, V-120, V-121, V-130, V-134, V-136, V-139, V-146, V-147). En la siguiente figura se encuentran resaltadas las válvulas que debe estar cerradas.

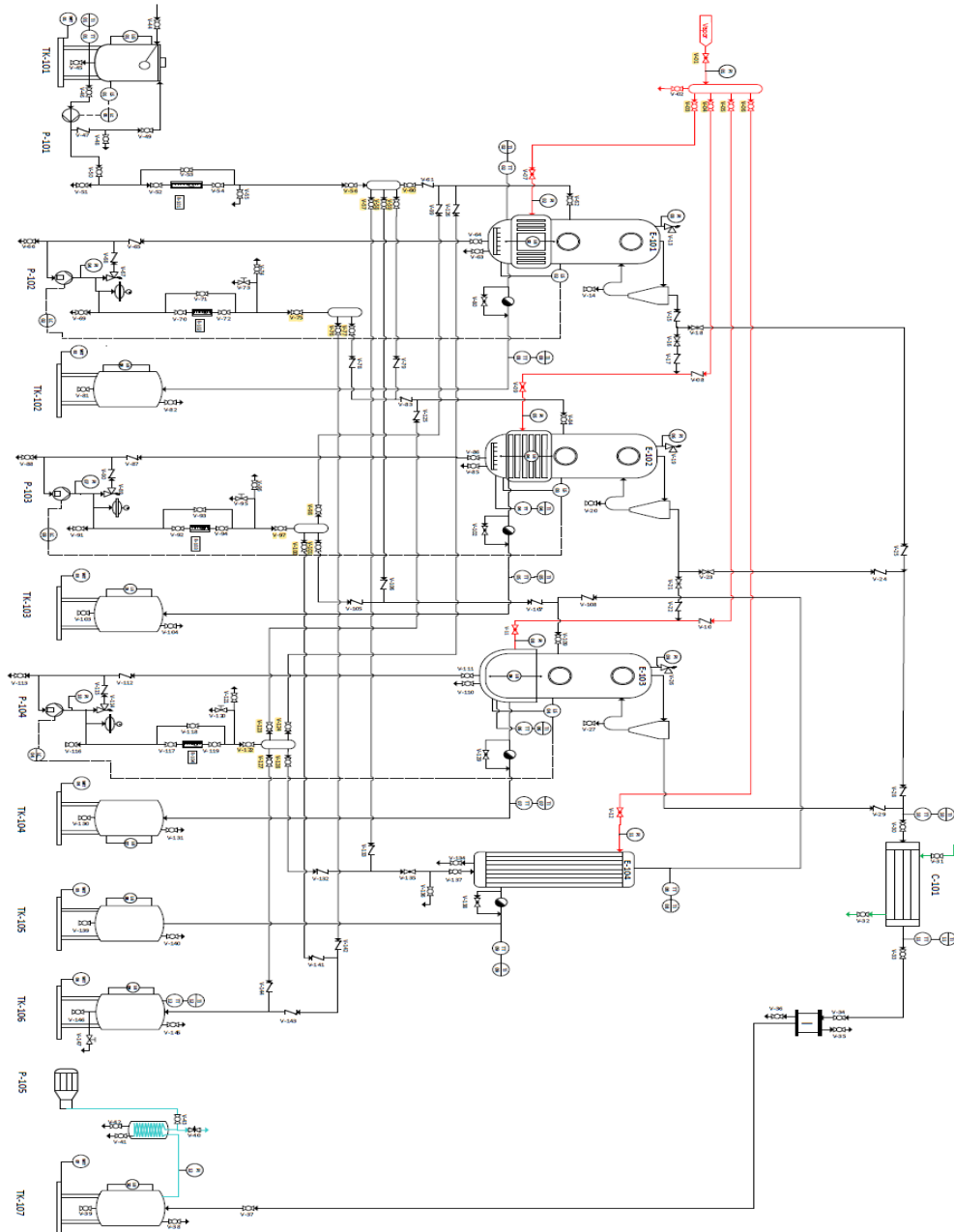
Figura 56. Válvulas de purga y toma muestras



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Verificar que cada una de las válvulas de salida de los dispositivos para distribución de flujo (manifolds) estén cerradas (V-01, V-03, V-04, V-05, V-06, V-56, V-57, V-58, V-59, V-60, V-75, V-76, V-77, V-97, V-98, V-100, V-101, V-122, V-123, V-124, V-127, V-128).

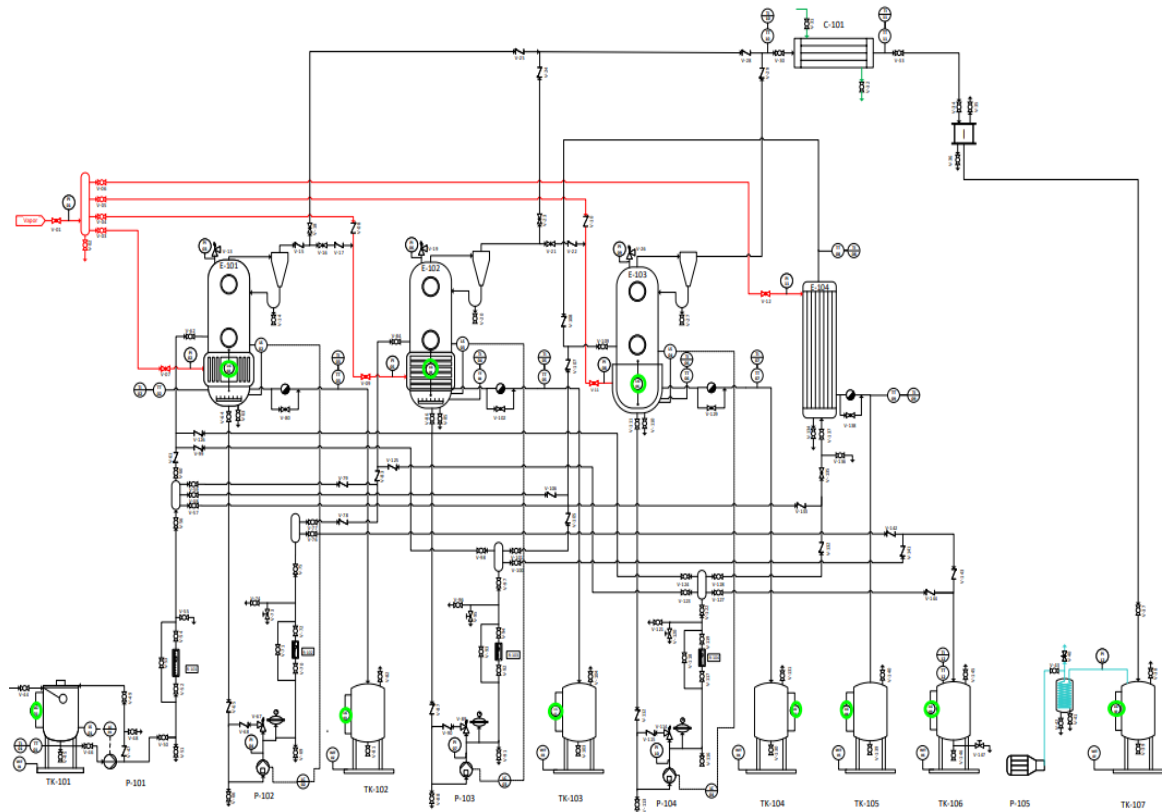
Figura 57. Válvulas de distribución de flujo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

- El requerimiento mínimo de agua de enfriamiento debe ser de 1 m<sup>3</sup>/h de lo contrario no se puede continuar con el proceso.
- Energizar las cajas eléctricas de controles. Verificar que el testigo luminoso que se encuentra sobre el pulsador de emergencia este encendido.
- Asegurarse que los indicadores de nivel se encuentran abiertos. Revisar: tanque de alimento (LG-01), tanques de recolección de condensados de vapor vivo (LG03, LG-05, LG-07 y LG-08), tanque de condensado total (LG-10) y tanque de producto (LG-09), evaporador vertical (LG-02), evaporador horizontal (LG-04), evaporador de chaqueta (LG-06). En la figura 17 se puede observar la ubicación de las mirillas de vidrio:

Figura 58. Ubicación mirillas de vidrio



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

#### 4.2.2 Arranque tanque alimentación.

- Abrir totalmente la válvula de succión (V-46) y la válvula de recirculación al tanque de alimentación (V-49). Cerrar la válvula de descarga de la bomba hacia el rotámetro (V-50).
- Retirar la tapa y cargar el tanque de alimentación (TK-101). La capacidad neta del tanque es de 50 L, y este se debe llenar máximo en un 80% (40 L). En caso de que la práctica se vaya a realizar con agua pura, abrir la válvula (V-44) que debe estar conectada al suministro de agua de la planta piloto.
- Encender la bomba de alimentación (P-101) desde el tablero de control y Luego de algunos minutos de recirculación de alimentación al tanque, se procede a la calibración del rotámetro de alimentación.

#### 4.3 SELECCIÓN DE SUSTANCIA A EVAPORAR

Para realizar la selección de la sustancia a evaporar en el tren de evaporación se seleccionaron 4 criterios que permiten asegurar la integridad del equipo y hacer una práctica segura y productiva para los estudiantes. El primer criterio es la corrosión que la sustancia pueda causar al equipo, esto con el fin de preservar la integridad del equipo; el segundo criterio es la evaluación monetaria representada en el costo de la práctica de laboratorio lo cual viene ligado al tercer criterio que es la aplicación industrial; el 4 criterio tenido en cuenta es la disposición de recursos, así como el reúso que se le puede dar a los fluidos producidos en el tren de evaporación.

La metodología empleada radica en un sistema de depuración en el que se tendrán en cuenta en el orden mencionado anteriormente los cuatro criterios seleccionados a fin de encontrar la sustancia que permita sacar el mayor provecho a la práctica de laboratorio sin comprometer la integridad del equipo y los estudiantes.

4.3.1 Corrosión. El material de construcción varía con respecto al fluido que va a ser evaporado, generalmente, estos están fabricados con algún tipo de acero al carbono, sin embargo, muchas de las disoluciones son altamente corrosivas ocasionando un deterioro del equipo, por otra parte, en procesos alimenticios se hace necesario que el equipo sea fabricado con acero inoxidable para preservar la inocuidad del alimento. Es por esto que se utilizan diferentes aleaciones tales como, cobre, níquel, acero inoxidable, grafito y plomo. Al usar aleaciones con los anteriores elementos ocasionaremos un aumento en el costo del equipo, es por esto que se busca una velocidad de transferencia de calor alta con el fin de minimizar al máximo el tamaño del equipo lo que se traduce en menor costo.<sup>4</sup>

El material de construcción del equipo robusto es acero inoxidable 304. Según la norma ASTM A240 su composición química se detalla a continuación.

Tabla 16. Composición química del acero inoxidable 304

Elemento	Composición (% en peso)
Carbón	0.07 máx.
Manganeso	2 máx.
Azufre	0.03 máx.
Fosforo	0.045 máx.
Silicio	0.75 máx.
Cromo	17.5-19.5
Níquel	8-10.5
Nitrógeno	0.1 máx.

Fuente: ASTM International. (2004). *ASTM A 240 "standard specification for chromium and chromium-nickel stainless steel plate, sheet, and strip for pressure vessels and for general applications"*. West Conshohocken, United States.

Este tipo de acero se desarrolló con el fin de minimizar la precipitación del carburo de cromo y la tendencia de corrosión intergranular en un rango de temperaturas de 426 a 900 °C. es ampliamente utilizado en la industria química y de alimentos gracias a la formación de óxido de cromo que actúa como capa pasivadora para impedir la corrosión del hierro. "Soporta oxidación ordinaria en la arquitectura y es inmune a ambientes donde se procesan alimentos (excepto posiblemente en condiciones de altas temperaturas incluyendo altos contenidos de ácido y cloruros). Resiste químicos orgánicos y una amplia variedad de químicos inorgánicos.

El tipo 304 también es buen resistente al ácido nítrico<sup>52</sup>. El material de fabricación es acero inoxidable 304 (SS 304) y los empaques presentes en el tren de evaporación son de teflón (PTFE) y EPDM.

El teflón (PTFE) es el material más resistente químicamente si se utiliza con ácidos minerales, alcalinos e hidrocarburos alifáticos lo cual es traducido en su costo elevado<sup>53</sup>, es una resina de carbono fluorado (Politetrafluoruroetileno) resistente al calor siendo uno de los materiales más estables a 260°C no existe descomposición apreciable, al 327°C el material toma un aspecto amorfo gelatinoso, sin fundirse y conservando su forma geométrica.<sup>54</sup>En la tabla 18 se mencionan algunas de sus propiedades físicas más relevantes.

<sup>52</sup> ITALUMINIO Herrajes y accesorios arquitectónicos. FICHA TECNICA DEL PRODUCTO ACERO INOXIDABLE 304&nbsp; [Consultado el Jul 7,2018]. Disponible en: [italuminio.com.co/catalogos/SS304-ficha.pdf](http://italuminio.com.co/catalogos/SS304-ficha.pdf)

<sup>53</sup> ASCA TM. MATERIALES DE PRODUCTOS Y COMPATIBILIDAD Elastómeros, Materias Plásticas Y Metales. Francia: 2005. p. 2

<sup>54</sup> INOXIDABLE,S. A. P.T.F.E. (politetrafluoroetileno) ALGUNAS PROPIEDADES. Sep 19,. [Consultado el Oct 10,2018]. Disponible en: <http://www.inoxidable.com/propiedades.htm>

Tabla 17. Propiedades del Teflón PTFE

Propiedad	Unidad	Método	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D 792	2.14-2.18
Carga de rotura	N/mm <sup>2</sup>	ASTM D 1457	20-35
Resistencia a la elongación		ASTM D 1457	210-400
Dureza (Shore D)		ASTM D 2240	50-60
Rigidez dieléctrica	kv/mm	ASTM 149	55

Fuente: INOXIDABLE, S. A. P.T.F.E. (politetrafluoroetileno) ALGUNAS PROPIEDADES. Sep 19,. [Consultado el Oct 10,2018]. Disponible en: <http://www.inoxidable.com/propiedades.htm>

El EPDM es un material compuesto de etileno, propileno y dieno de alta calidad por ello su nombre, adicionalmente se le agrega la letra M con el fin de indicar que cuenta con una cadena saturada de propileno según la clasificación ASTM.

Se utiliza en forma de juntas para electroválvulas y válvulas de vapor gracias a su resistencia a la deformación remanente después de la compresión. Se adapta en general a la mayoría de sustancias química excepto a fluidos a base de petróleo o contaminados por este como aire lubricado. Su temperatura de operación va entre -20°C a 180°C<sup>55</sup>. En la tabla 19 se mencionan algunas de sus propiedades más importantes.<sup>55</sup>

Tabla 18. Propiedades de EPDM

Propiedad	Unidad	Método	Valor
Densidad	g/cm <sup>3</sup>		1.31±0.05
Tensión de rotura	MPa	ISO 37	≥7
Resistencia al desgarro	N/mm	ISO 34-1	≥20
Dureza (Shore A)		ASTM D 2240	70±5
Deformación remanente después de 22h a 70°C	%	ISO 815-1	≤30

Fuente: Elaplas elastómeros y plásticos. características etileno-propileno (EPDM). [Consultado el Oct 13,2018]. Disponible en: <http://www.elaplas.es/wp-content/uploads/EPDM.pdf>

De acuerdo al anexo Q suministrado por el fabricante, se realiza una clasificación de 188 compuestos químicos según la compatibilidad que tiene con los materiales de fabricación del equipo.

Esta tabla es la herramienta primordial para realizar la pre selección de la sustancia a evaporar. Utiliza convenciones como lo son:

<sup>55</sup> Elaplas elastómeros y plásticos. características etileno-propileno (EPDM). [Consultado el Oct 13,2018]. Disponible en: <http://www.elaplas.es/wp-content/uploads/EPDM.pdf>

- A: excelente compatibilidad, esto se traduce en que no hay riesgo de corrosión del material de fabricación del equipo.
- B: buena, es decir la corrosión es mínima y no causa daños en el equipo a corto plazo.
- C: aceptable, se produce una corrosión moderada y no es recomendable utilizar constantemente dicha sustancia.
- D: efecto severo, por ningún motivo se deben usar este tipo de sustancias en el equipo ya que lo afecta totalmente.
- N/A: información no disponible.

Adicionalmente en el anexo P<sup>56</sup> se encuentra una compilación más robusta ya que abarca un total de 570 compuestos con el fin de garantizar la correcta selección del compuesto a evaporar. Debido enfoque educativo que tiene el tren de evaporación, se trabajaran únicamente las sustancias que no pongan en riesgo la integridad del equipo esto con el fin de mantener la vida útil del equipo para que los estudiantes de la Fundación Universidad de América saquen el mayor provecho de los equipos. Gracias a esta preselección realizada solo 42 compuestos no causan efecto alguno sobre el equipo, en la tabla 20 se presenta una lista con sus nombres.

*Tabla 19. Sustancias que no causan corrosión*

<b>sustancia Química</b>		
Aceite de palma	Coca cola (syrup)	Sulfato de magnesio
Acetato de amilo00	Detergentes	Trietilamina
Líquidos de remolacha	Dietilenglicol	Acetileno
Glucosa (jarabe de maíz)	Etanol	Melaza
Ácido cítrico 5%	Formaldehido 40%	Metanol
Ácido fosfórico 10%	Gelatina	Metasilicato de sodio
Ácido fosfórico 20%	Glicerol	Metil etil cetona
Ácido láctico (Solución 5%)	Acetona	Metilamina
Ácido sulfúrico 10%	Jugo de caña	Miel
Agua desionizada	Látex	Óxido de calcio
Agua destilada	Leche	Alcohol isobutílico
Alcohol amílico	Licor de azúcar de caña	Amoniaco 10%
Azúcar (líquidos)	Cerveza	Anhídrido ftálico
Bicarbonato de sodio	Cetonas	Carbonato de sodio

Fuente: elaboración propia

<sup>56</sup> Proindecsa, proyectos y delegaciones, S.C. Tablas De Resistencia Química&nbsp; San gines-Murcia españa: p. 1-10

4.3.2 Costos. El factor monetario juega un papel fundamental en al momento de seleccionar el material para realizar prácticas de laboratorio con el fin de impartir docencia es por esto que partiendo de la tabla 21 se realizó una búsqueda de precios de los materiales con el fin de evaluar tanto precio como aporte a la formación del estudiante. En la siguiente tabla se relacionan los precios por kg o L.

Tabla 20. Precios de sustancias a evaporar

<b>sustancia química</b>	<b>PRECIO \$</b>	<b>unidad</b>	<b>Sustancia química</b>	<b>Precio \$</b>	<b>Unidad</b>
Líquidos de remolacha	700 <sup>57</sup>	kg	Licor de azúcar de caña	10000	L
Melaza	900 <sup>58</sup>	kg	Miel	12000	Kg
Agua desionizada	1200	L	Jugo de caña	12500	L
Aceite de palma	1913 <sup>59</sup>	kg	Acetato de amilo	16000 <sup>60</sup>	L
Agua destilada	2750	L	Etanol	45000	L
Coca cola (syrup)	3000	L	Ácido sulfúrico 10%	99000 <sup>61</sup>	L
Leche	3100	L	Amoniaco 10%	99000	L
Azúcar (líquidos)	3500	kg	Metilamina	100000	L
Glicerol	3800 <sup>62</sup>	L	Glucosa (jarabe de maíz)	115777	Kg
Metasilicato de sodio	4000 <sup>63</sup>	kg	Carbonato de sodio	118000	Kg
Cerveza	4500	L	Ácido láctico (Solución al 5%)	123000	L
Gelatina	6500	kg	Ácido fosfórico 10%	134000	L
Amoniaco 10%	99000	L	Ácido fosfórico 10%	134000	L
Metilamina	100000	L	Ácido fosfórico 20%	134000	L

<sup>57</sup> CORABASTOS. Boletín Diario De Precios. Bogotá, Colombia: 2018. p. 1-6

<sup>58</sup> animals drogas e implementos. Precio melaza; [Consultado el Nov 10,2018]. Disponible en: <https://animalsveterinaria.com/pasto/27344-27345-melaza-bulto-x-30kg.html>

<sup>59</sup> FEDEPALMA. Precios De Referencia Fondo De Fomento Palmero. Colombia: 2018. p. 1

<sup>60</sup> Elementos Químicos Ltda. Reactivos importados. Feb 26,. [Consultado el Nov 10,2018]. Disponible en: <http://www.elementosquimicos.com.co/media/descargas/listasdeprecios/R-IMPORTADOS.pdf>

<sup>61</sup> Elementos Químicos Ltda. Reactivos nacionales; Feb 26,. [Consultado el Nov 10,2018]. Disponible en: <http://www.elementosquimicos.com.co/media/descargas/listasdeprecios/R-NACIONALES.pdf>

<sup>62</sup> Quiminet. Precio Glicerol. Mar 20,. [Consultado el Nov 10,2018]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/productos/glicerol-1475726529/precios.htm>

<sup>63</sup> distribuidor aliados. Metasilicato de sodio. [Consultado el Nov 11,2018]. Disponible en: <http://www.distribuidoraaliados.com/portfolio-items/metasilicato-de-sodio/>



<b>sustancia química</b>	<b>PRECIO \$</b>	<b>unidad</b>	<b>Sustancia química</b>	<b>Precio \$</b>	<b>Unidad</b>
Glucosa (jarabe de maíz)	115777	kg	Metil etil cetona	153000	L
Ácido cítrico 5%	289000	kg	Dietilenglicol	354000	L
Sulfato de magnesio	315000	kg	Trietilamina	365000	L
Acetona	45000	L	Óxido de calcio	411000	kg
Acetileno	47773	kg	Anhídrido ftálico	418000	kg
Formaldehido 40%	75000	L	Látex	N/D	
Bicarbonato de sodio	77000	kg	Cetonas	variable	
			Metanol	45000	L

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a las capacidades que tiene el evaporador (30 L) se limita el valor de la práctica a \$ 45000 por otra parte, y teniendo en cuenta la aplicación industrial que puede darse con esta limitación se encontró que se han realizado trabajos en los cuales se pone en práctica la concentración de azúcar como Heluane<sup>64</sup> y López<sup>65</sup>.

Particularmente en la industria panelera para concentrar dicho jugo y poder posteriormente obtener la panela por otro lado, también se halló la aplicación en concentración de leche gourdon<sup>66</sup>, morison<sup>67</sup>, mura & gourdon<sup>68</sup>, curtis<sup>69</sup>, la cual se realiza para posteriormente hacer la leche en polvo.

Aunque los costos de la remolacha son bajos, su producción se hace tediosa y se debe pasar por un proceso de remoción de sólidos, así como su licuado con el fin de obtener el producto, la melaza es un producto altamente viscoso ( 1700-800

<sup>64</sup> HELUANE, Humberto, et al. PLANTEAMIENTO OPERATIVO DE REDES DE EVAPORACIÓN. En: Iberoamerican Journal of Industrial Engineering. vol. 5, no. 9, p. 358-375

<sup>65</sup> LÓPEZ, RICARDO. Evaluación Técnica Y Económica De La Implementación De Un Sistema De Evaporación De Múltiple Efecto En Los Procesos Productivos De La Panela. Universidad Nacional de Colombia, 2016. p. 26-45

<sup>66</sup> GOURDON, Mathias y MURA, Ernesto. Performance evaluation of falling film evaporators in the dairy industry. En: Food and Bioproducts Processing. Jan. vol. 101, p. 22-31

<sup>67</sup> MORISON, Ken R. Reduction of fouling in falling-film evaporators by design. En: Food and Bioproducts Processing. Jan. vol. 93, p. 211-216

<sup>68</sup> MURA, Ernesto y GOURDON, Mathias. Pressure drop in dairy evaporators: Experimental study and friction factor modelling. En: Journal of Food Engineering. Feb. vol. 195, p. 128-136

<sup>69</sup> PARK, Curtis W. y DRAKE, MaryAnne. Condensed milk storage and evaporation affect the flavor of nonfat dry milk. En: Journal of Dairy Science. Dec. vol. 99, no. 12, p. 9586-9597

CPS)<sup>70</sup> y su dilución en agua necesita un proceso de agitación constante, lo que hace demorado preparar la solución, el proceso de evaporación de agua (desionizada o destilada) solo permite mostrar el funcionamiento de equipo pero a nivel industrial no se realiza este procedimiento por lo tanto no genera grandes beneficios en la parte académica, de igual forma sucede con los demás reactivos que no se encuentran en el rango de precios establecidos.

4.3.3 Disposición de residuos. De acuerdo al análisis realizado para seleccionar las posibles sustancias a evaporar en el equipo adquirido por la Fundación Universidad de América viendo parámetros como la corrosión causada al equipo y los costos de la práctica, se presenta en siguiente tabla los candidatos preseleccionados.

*Tabla 21. Sustancias preseleccionadas para evaporar*

<b>sustancia química</b>
Azúcar
Leche

Fuente: elaboración propia

Con el fin de evaluar el ultimo parámetro referente a disposición de residuos se trabajarán las sustancias mencionadas en la tabla 22.

En primera instancia durante el proceso de concentración de una solución azucarada se genera agua la cual debe ser condensada y para ello se utiliza agua de servicio, en esta instancia el agua condensada posee una cantidad de azúcar mínima la cual hace que se pueda someter a un proceso de reutilización como alimento a la caldera para la generación de vapor además, sea usada para realizar lavados a los equipos adicionando el ácido y la base (HCL y NaOH) utilizados para remover las incrustaciones. Por otra parte, la solución concentrada se le pueden dar los siguientes usos:

Obtención de proteína unicelular, para aguas que posean una Demanda Química de oxígeno (DQO) de 14278 mg/l y la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de 5889 mg/l pueden ser sometidas a una sedimentación primaria que proporciona una remoción aproximada de 32% y un 37% para BBO y DQO respectivamente, posteriormente realizar una fermentación utilizando una población mixta de las levaduras (Y-900/CNIC), seguidamente se efectúa una precipitación con hidróxido de calcio. Gracias a la sucesión de procesos se obtiene una masa seca con un porcentaje de proteína de 20, esta masa es útil para la alimentación de gallinas ponedoras.

Utilización para fertirriego: Estos residuales contienen cantidades apreciables de nitrógeno, fósforo y potasio y otros nutrientes beneficiosos para el crecimiento y

<sup>70</sup> COMEL (Compañía de melazas S.A.); VISCOSIDAD Y PREPARACIÓN DE LA MELAZA. [Consultado el Oct 22,2018]. Disponible en: <http://www.ciademelazas.com/viscosidad.asp>

desarrollo de las plantas, constituyen valiosos recursos para regar y fertilizar la caña de azúcar y otros cultivos<sup>71</sup>. Si se desea realizar un proceso de vertimiento se debe seguir la resolución 631 de 2015<sup>72</sup>, en su capítulo VI se presentan los parámetros fisicoquímicos que deben ser cumplidos.

*Tabla 22. Límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de aguas residuales no domésticas (ARND) a cuerpos de aguas superficiales*

Parámetro	unidades	Valor
pH	Unidades de pH	6-9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l O <sub>2</sub>	900
Demanda Biológica de oxígeno (DBO)	mg/l O <sub>2</sub>	500
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	200
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/l	2
Grasas y aceites	mg/l	20
Compuestos semi volátiles fenólicos	mg/l	Análisis y reporte
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/l	Análisis y reporte
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/l	10
Ortofosfatos (P-PO43)	mg/l	Análisis y reporte

Fuente. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 631 (18 de abril de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.73 P.

Para la utilización de leche en el evaporador con el fin de realizar una concentración de la misma se deben tener en cuenta la producción de agua que realiza durante el proceso.

Gracias al artículo 29,30 y 31 del decreto 616 de 2006 referentes a la calidad del vapor de agua para la caldera no se puede realizar un proceso de reutilización del agua producida debido a que debe ser grado alimenticio, saturado, seco, exento de aire y conducido por tuberías de acero inoxidable, esto no puede ser garantizado ya que, al ser un equipo de múltiple propósito, no puede garantizarse que el agua cumpla con lo estipulado.

La solución concentrada de leche puede ser utilizada en diferentes procesos como lo son: producción de leche en polvo, quesos, mantequilla entre otras. La

<sup>71</sup> SANTIESTEBAN, Inginio. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA Y LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO TANA. En: Revista Caribeña De Ciencias Sociales. p. 14-18

<sup>72</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 631 (18 de abril de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.73 P.

normatividad <sup>72</sup> especifica los valores de vertimiento de aguas a sistemas de alcantarillado.

*Tabla 23 Valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales de las actividades industriales, comerciales o de servicios; y de las aguas residuales (ARD y ARND) de los prestadores del servicio público de alcantarillado a cuerpos de aguas superficiales*

Parámetro	unidades	Valor
pH	Unidades de Ph	6-9
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/l O <sub>2</sub>	180
Demanda Biológica de oxígeno (DBO)	mg/l O <sub>2</sub>	90
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/l	90
Sólidos sedimentables (SSED)	mg/l	5
Grasas y aceites	mg/l	20
Compuestos semi volátiles fenólicos	mg/l	Análisis y reporte
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/l	Análisis y reporte
Hidrocarburos totales (HTP)	mg/l	Análisis y reporte
Ortofosfatos (P-PO43)	mg/l	Análisis y reporte

Fuente. COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 631 (18 de abril de 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores límites máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones.<sup>73</sup> P.

#### 4.4 GUÍA EXPERIMENTAL TREN DE EVAPORACIÓN

El objetivo que tiene esta sección es realizar una aproximación real a la evaporación como operación unitaria, empleando un tren de evaporación a escala piloto aplicado un proceso de concentración usado en la industria azucarera. la guía experimental de laboratorio se compone de dos prácticas, la primera titulada evaporación de simple efecto presente en el anexo r y la segunda titulada evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo la cual se encuentra en el anexo s del presente trabajo.

## 5. CONCLUSIONES

- Con respecto a las condiciones de operación suministradas por el fabricante en el manual de operación se realizó una completa descripción del equipo en el que se incluyen:
  - Lista de chequeo con los componentes presentes en el tren de evaporación.
  - Imágenes de la ubicación de cada una de las válvulas presentes.
  - Caracterización de cada uno de los equipos del tren de evaporación.
- Dentro de la caracterización realizada se explica de manera detallada dimensiones y tipos de elementos que componen el tren de evaporación como ciclones, trampas de vapor, los diferentes evaporadores los cuales poseen una capacidad de 17 litros, intercambiadores de calor, válvulas de cheque, globo, compuerta, aguja, bola y alivio, bombas centrifugas con una potencia de 0.5 kW, de vacío con una potencia de 0.145 kW y dosificadoras con una potencia de 0.23 kW entre otros elementos los cuales están consignados en un listado maestro de documentos disponibles para realizar la verificación una vez sea instalado el tren de evaporación.
- De acuerdo a la información suministrada por el fabricante, se realizó el modelado matemático teniendo en cuenta, balances de materia y energía junto con las elevaciones del punto de ebullición y las correcciones de temperatura respectivas posteriormente se realizó una simulación en estado estacionario del tren de evaporación adquirido por la Fundación Universidad de América utilizando Aspen Plus, donde se usaron equipos como condensadores y separadores flash principalmente para recrear el proceso, así como se añadieron las bombas que permiten realizar el cambio de presión en el tren de evaporación. La simulación se validó mediante la ejecución de dos problemas propuestos en la literatura; el primero el ejemplo 8.5.1 del Geankoplis y el segundo el ejemplo 3.16 del Ocon obteniéndose errores del 1% los cuales son mostrados en las tablas 16 y 17 de presente trabajo.
- Se evaluó el efecto que tiene la presión y la temperatura en la fracción másica del producto final por medio de una simulación en Aspen Plus, en él se obtuvo que aumentando la presión del vapor vivo conllevará a un aumento de la temperatura de vapor y por ende la concentración se verá favorecida, el aumento no es significativo ya que al aumentar la presión de 1 a 2 bares solo logra un aumento de 0.03 en peso de sacarosa. Por otra parte, realizar un precalentamiento de la solución a evaporar causa un efecto significativo al aumentar la temperatura en 30 °C causa un aumento de 0.35 en fracción másica de sacarosa. Este proceso se puede realizar aprovechando la corriente de vapor que debe ser condensada con agua de servicio.

- La disminución tanto de la temperatura como de la presión en el evaporador causan un aumento en la concentración del producto ya que el punto de ebullición de la solución baja y se requiere menos energía para evaporar la solución y por ende causa una disminución en los requerimientos de vapor vivo.
- Se elaboraron un total de tres guías de laboratorio; la primera tiene como objetivo realizar una introducción al tren de evaporación en la que se incluyen diferentes normas que deben ser tenidas en cuenta al momento de manipular el tren de evaporación, se abordan temas de seguridad en el área de trabajo con temas como identificación de tuberías y señalización en el área de trabajo. Las dos guías restantes son de tipo experimental en las cuales se enfrenta al estudiante al desafío de manipular un equipo robusto a escala piloto creando escenarios como el juego de roles donde cada integrante adopta una función específica dentro de un equipo de trabajo, simulando una planta real.
- Las guías de laboratorio permiten evaporar una solución de sacarosa utilizando de diferentes maneras el tren de evaporación, en la primera se utiliza una evaporación de simple efecto en la que se observará que el gasto energético es considerablemente grande y por ende poco rentable para la industria; en la segunda práctica se hace uso de un tren de evaporación de triple efecto, observando que los requerimientos energéticos disminuyen a un tercio del valor gastado con un solo efecto.

## 6.RECOMENDACIONES

- Se debe realizar una actualización y verificación de los elementos instalados en el tren de evaporación al momento de tener instalada dicha planta.
- Realizar la simulación en estado dinámico de manera rigurosa especificando cada equipo al detalle, como intercambiadores de calor. Por otra parte, añadir ciclones, trampas de vapor, válvulas y longitud de tuberías.
- Analizar el arranque del tren de evaporación en el simulador Aspen plus en el cual se pueda calcular de manera precisa el comportamiento del equipo en dicha etapa.
- Realizar un detallado sistema de control al tren de evaporación con el fin de automatizar el proceso.
- Diseñar procesos de optimización que tengan que ver con integración energética en el cual se pueda realizar un precalentamiento al alimento con el fin de disminuir costos.
- Aumentar el número de prácticas de laboratorio con el fin de diversificar el contenido teniendo en cuenta los criterios de selección de las sustancias a evaporar.

## BIBLIOGRAFÍA

ÁLVARO NÚÑEZ; ENRIQUE TARIFA AND NORMA FARFÁN. STATIONARY SIMULATION OF A DOUBLE EFFECT EVAPORATOR FOR TOMATO JUICE. EN: AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA. DEC 1.,VOL. 3, NO. 4, P. 1-9

ANIMALS DROGAS E IMPLEMENTOS. PRECIO MELAZA&NBSP; [CONSULTADO EL NOV 10,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://ANIMALSVETERINARIA.COM/PASTO/27344-27345-MELAZA-BULTO-X-30KG.HTML](https://animalsveterinaria.com/pasto/27344-27345-melaza-bulto-x-30kg.html)[HTTPS://ANIMALSVETERINARIA.COM/PASTO/27344-27345-MELAZA-BULTO-X-30KG.HTML](https://animalsveterinaria.com/pasto/27344-27345-melaza-bulto-x-30kg.html)

ARIAS VARGAS, NOHORA MARLEN. USO DE UN JUEGO DE ROL COMO HERRAMIENTA DE MOTIVACIÓN EN LA ENSEÑANZA DE LA QUÍMICA&NBSP; UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2012. P. 11-15.

ASCA TM. MATERIALES DE PRODUCTOS Y COMPATIBILIDAD ELASTÓMEROS, MATERIAS PLÁSTICAS Y METALES. FRANCIA: 2005. 2

AVALO, BELKIS; PÉREZ, SERGIO AND TOVAR, MARCOS. CARACTERIZACIÓN PRELIMINAR DEL PROCESO DE CONCENTRACIÓN DEL JUGO NATURAL DE NARANJA EN UN EVAPORADOR DE TRES EFECTOS. EN: INTECIENCIA. NOV.,VOL. 34, NO. 11, P. 784-790

BARBOSA CÁNOVAS,G. AND VEGA MERCADO,H. DESHIDRATACION DE ALIMENTOS. ZARAGOZA, ESPAÑA: ACRIBIA EDITORIAL, 2000. 297 P. ISBN 9788420009186

BELGHAIEB, JALEL, ET AL. SIMULATION AND OPTIMIZATION OF A TRIPLE-EFFECT DISTILLATION UNIT. EN: ENERGY AND ENVIRONMENT RESEARCH UNIT, NATIONAL ENGINEERING SCHOOL OF GABES, GABES UNIVERSITY, TUNISIA. P. 1-6

BELLINGER, GENE. MODELING & SIMULATION. OUTSIGHTS CORP, 1997. 48 P.

BENVENUTO, NICOLAS AND JULIO, YAIR. MESA DINAMOMÉTRICA PARA INVESTIGACIÓN. UNIVERSIDAD ARGENTINA DE LA EMPRESA, 2013. P. 32-34.

BETANCUR, LAURA AND LANCHEROS, PAULA. EVALUACIÓN DE DOS ALTERNATIVAS CON RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS



EN EL TRATAMIENTO DE GAS NATURAL CON RESPECTO AL MÉTODO JOULE THOMSON. FUNDACIÓN UNIVERSIDAD AMÉRICA, 2017. P. 55-58.

BRENNAN, J. C., *ET AL.* LAS OPERACIONES DE LA INGENIERÍA DE LOS ALIMENTOS. 3RD ED. ZARAGOZA, ESPAÑA: ACRIBIA S.A., 1998. 343-375 P.

CARLSON, ERIC. DON'T GAMBLE WITH PHYSICAL PROPERTIES FOR SIMULATIONS. EN: SUCCEEDING AT SIMULATION. OCT.,P. 36

CEDRÓN, J., LANDA, V. AND ROBLES, J. POLARIDAD DE MOLÉCULAS. [CONSULTADO EL JUL 13,2018]. DISPONIBLE EN: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

CHANG, RAYMOND AND COLLEGE, WILLIAMS. QUÍMICA. 7TH ED. MÉXICO: MCGRAW-HILL, 2002. 340-341 P. ISBN 0-07-365601-1

CHEN, CHAU-CHYUN AND SONG, YUHUA. GENERALIZED ELECTROLYTE-NRTL MODEL FOR MIXED-SOLVENT ELECTROLYTE SYSTEMS. EN: AICHE JOURNAL. -08-01.VOL. 50, NO. 8, P. 1928-1941

CLIMATE TECHNOLOGIES, EMERSON. EL ROTÁMETRO. -06-23 15:40.P. 1

COMEL (COMPAÑIA DE MELAZAS S.A.). &NBSP; VISCOSIDAD Y PREPARACIÓN DE LA MELAZA. [CONSULTADO EL OCT 22,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTP://WWW.CIADEMELAZAS.COM/VISCOSIDAD.ASP](http://www.ciademelazas.com/viscosidad.asp)

CORABASTOS. BOLETÍN DIARIO DE PRECIOS. BOGOTÁ, COLOMBIA: 2018. 1-6

CORREDOR, ERIKA. INFORMACIÓN TREN DE EVAPORADORES. BOGOTÁ, COLOMBIA: 2018. 1-3

COSS BU, RAÚL. SIMULACIÓN UN ENFOQUE PRÁCTICO. 1ST ED. MÉXICO: LIMUSA, 2003. 11-13 P. ISBN 9681815068

CREUS, ANTONIO. INSTRUMENTACIÓN INDUSTRIAL. 8TH ED. MÉXICO: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, 2010. 254-257 P.

DEPARTMENT OF DEFENSE UNITED STATES OF AMERICA. DOD MODELING AND SIMULATION (M&S) GLOSSARY. WASHINGTON D.C: 1998. 45

DISTRIBUIDORAALIADOS. METASILICATO DE SODIO. [CONSULTADO EL NOV 11,2018]. DISPONIBLE EN:

[HTTP://WWW.DISTRIBUIDORAALIADOS.COM/PORTFOLIO-ITEMS/METASILICATO-DE-SODIO/](http://www.distribuidoraaliados.com/PORTFOLIO-ITEMS/METASILICATO-DE-SODIO/)

ECHEVERRI LONDOÑO, CARLOS ALBERTO. DISEÑO ÓPTIMO DE CICLONES. EN: REVISTA INGENIERÍAS UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN. VOL. 5, NO. 9, P. 123-139

ECOPETROL, S. A. GLOSARIO DE PALABRAS COMÚNMENTE SE USAN EN ECOPETROL. -11-18T16:30:00-05:00. [CONSULTADO EL AUG 25,2017]. DISPONIBLE EN:  
[HTTP://WWW.ECOPETROL.COM.CO/WPS/PORTAL/ES/ECOPETROL-WEB/NUUESTRA-EMPRESA/SERVICIOS-DE-INFORMACION-AL-CIUDADANO/GLOSARIO/A-B](http://www.ecopetrol.com.co/WPS/PORTAL/ES/ECOPETROL-WEB/NUUESTRA-EMPRESA/SERVICIOS-DE-INFORMACION-AL-CIUDADANO/GLOSARIO/A-B)

ELAPLAS ELASTÓMEROS Y PLÁSTICOS. CARACTERÍSTICAS ETILENO-PROPILENO (EPDM). [CONSULTADO EL OCT 13,2018]. DISPONIBLE EN:  
[HTTP://WWW.ELAPLAS.ES/WP-CONTENT/UPLOADS/EPDM.PD](http://www.elaplas.es/wp-content/uploads/EPDM.PD)

ELEMENTOS QUÍMICOS LTDA. REACTIVOS NACIONALES&NBSP; FEB 26,. [CONSULTADO EL NOV 10,2018]. DISPONIBLE EN:  
[HTTP://WWW.ELEMENTOSQUIMICOS.COM.CO/MEDIA/DESCARGAS/LISTASD EPRECIOS/R-NACIONALES.PDF](http://www.elementosquimicos.com.co/MEDIA/DESCARGAS/LISTASD EPRECIOS/R-NACIONALES.PDF)

ELEMENTOS QUÍMICOS LTDA. REACTIVOS IMPORTADOS. FEB 26,. [CONSULTADO EL NOV 10,2018]. DISPONIBLE EN:  
[HTTP://WWW.ELEMENTOSQUIMICOS.COM.CO/MEDIA/DESCARGAS/LISTASD EPRECIOS/R-IMPORTADOS.PDF](http://www.elementosquimicos.com.co/MEDIA/DESCARGAS/LISTASD EPRECIOS/R-IMPORTADOS.PDF)

FEDEPALMA. PRECIOS DE REFERENCIA FONDO DE FOMENTO PALMERO. COLOMBIA: 2018. 1

FELICÍSIMO, ANGEL. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO. INTRODUCCIÓN Y APLICACIONES EN LAS CIENCIAS AMBIENTALES. PENDALFA EDITORES, 1994. 3-4 P. ISBN 9788478484751

FORERO, FREDDY AND VELEZ, CARLOS. OPTIMIZACION DE LA CONCENTRACION POR EVAPORACION OSMOTICA DEL JUGO DE MARACUYA (PASSIFORA EDULLIS). EN: DYNA. JAN 1, .VOL. 80, NO. 179, P. 90-99

FRANCO, ALBERTO. DISEÑO DE UN SIMULADOR POR COMPUTADORA DE PROCESOS DE EVAPORACIÓN EN UNA LÍNEA DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO&NBSP; UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2006. P. 1-80.

GEANKOPLIS, C. J. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS. 3RD ED. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 P.

GÓMEZ, ELVIS. MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE JUGO CLARIFICADO PARA LA ETAPA DE AMPLIACIÓN DE MOLIENDA DE LA EMPRESA AGROINDUSTRIAL SAN JACINTO&NBSP; TRUJILLO, PERÚ.: UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO, 2014. P. 30-33.

GOURDON, MATHIAS AND MURA, ERNESTO. PERFORMANCE EVALUATION OF FALLING FILM EVAPORATORS IN THE DAIRY INDUSTRY. EN: FOOD AND BIOPRODUCTS PROCESSING. JAN.VOL. 101, P. 22-31

GRUPO COMPÁS. VÁLVULAS DE RETENCIÓN O DE ANTIRRETORNO. [CONSULTADO EL SEP 25 ,2018]. DISPONIBLE EN: <HTTP://VALVULA.ES/TIPOS-DE-VALVULAS/VALVULAS-DE-RETENCION.PHP>

HELUANE, HUMBERTO, ET AL. PLANTEAMIENTO OPERATIVO DE REDES DE EVAPORACIÓN. EN: IBEROAMERICAN JOURNAL OF INDUSTRIAL ENGINEERING. VOL. 5, NO. 9, P. 358-375

HERMES, A. RANGEL JARA AND ARGOTI, ANDRÉS. CÁLCULO NUMÉRICO DE UN EVAPORADOR QUÍMICO SOBRE UNA HOJA ELECTRÓNICA. EN: INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN. SEP 1,.,NO. 44, P. 48-55

INNOVA INGENIERÍA. CICLONES. [CONSULTADO EL JUL 10,2018]. DISPONIBLE EN: <HTTP://INNOVA-ING.COM/2017/10/11/CICLONES/>

INOXIDABLE, S.A. P.T.F.E. (POLITETRAFLUOROETILENO) ALGUNAS PROPIEDADES. SEP 19,. [CONSULTADO EL OCT 10,2018]. DISPONIBLE EN: <HTTP://WWW.INOXIDABLE.COM/PROPIEDADES.HTM>

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. COMPENDIO DE NORMAS PARA TRABAJOS ESCRITOS.NTC-1486- 6166. BOGOTÁ D.C.:9789588585673 153 P.

ITALUMINIO HERRAJES Y ACCESORIOS ARQUITECTÓNICOS. FICHA TECNICA DEL PRODUCTO ACERO INOXIDABLE; [CONSULTADO EL JUL 7,2018]. DISPONIBLE EN: <ITALUMINIO.COM.CO/CATALOGOS/SS304-FICHA.PDF>

KAYA, DURMUS AND IBRAHIM SARAC, H. MATHEMATICAL MODELING OF MULTIPLE-EFFECT EVAPORATORS AND ENERGY ECONOMY. 2007. 1536-1542

LÓPEZ, RICARDO. EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE EVAPORACIÓN DE MÚLTIPLE EFECTO EN LOS PROCESOS PRODUCTIVOS DE LA PANELA. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA, 2016. P. 26-45.

MCCABE, WARREN; SMITH, JULIAN AND HARRIOTT, PETER. OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA; 4TH ED. ESPAÑA: MCGRAW-HILL, 1991. 482-520 P.

MESFUN, SENNAI AND TOFFOLO, ANDREA. OPTIMIZATION OF PROCESS INTEGRATION IN A KRAFT PULP AND PAPER MILL – EVAPORATION TRAIN AND CHP SYSTEM. EN: APPLIED ENERGY. JUL.VOL. 107, P. 98-110

METAS & METRÓLOGOS ASOCIADOS. EL MANÓMETRO BOURDON. EN: LA GUÍA METAS. ZAPOTLÁN EL GRANDE, JALISCO, MÉXICO. P. 1-5

MORISON, KEN R. REDUCTION OF FOULING IN FALLING-FILM EVAPORATORS BY DESIGN. EN: FOOD AND BIOPRODUCTS PROCESSING. JAN.VOL. 93, P. 211-216

MURA, ERNESTO AND GOURDON, MATHIAS. PRESSURE DROP IN DAIRY EVAPORATORS: EXPERIMENTAL STUDY AND FRICTION FACTOR MODELLING. EN: JOURNAL OF FOOD ENGINEERING. FEB.VOL. 195, P. 128-136

NÚÑEZ, ÁLVARO; TARIFA, ENRIQUE AND FARFÁN, NORMA. SIMULACIÓN ESTACIONARIA DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO PARA JUGO DE TOMATE. EN: AVANCES EN CIENCIAS E INGENIERÍA. JAN 1,.VOL. 3, NO. 4, P. 1-9

PADILLA, BRENDA. DISEÑO DE UN EVAPORADOR TIPO MARMITA CON AGITADOR Y SERPENTÍN INTERNO PARA LA ELABORACIÓN DE DIVERSOS ALIMENTOS EN PLANTA PILOTO. UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, 2013. P. 1-79.

PANANA, ALBERTO. DISEÑO DE EVAPORADORES DE MÚLTIPLE EFECTO, CONECTADOS EN SERIE; CALLAO, PERÚ: 2013.

PARK, CURTIS W. AND DRAKE, MARYANNE. CONDENSED MILK STORAGE AND EVAPORATION AFFECT THE FLAVOR OF NONFAT DRY MILK. EN: JOURNAL OF DAIRY SCIENCE. DEC.VOL. 99, NO. 12, P. 9586-9597

POLO, MANUEL; BERNÁ, JOSE AND GIL, JAVIER. MODELADO ANÁLISIS Y CONTROL DE UN EVAPORADOR DE DOBLE EFECTO&NBSP; P. 15

PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. GUIAS DE LABORATORIO TREN DE EVAPORACIÓN TRIPLE EFECTO REF. TE. BOGOTÁ: 2018. 2-25

PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. MANUAL DE OPERACIÓN&NBSP; TREN DE EVAPORACIÓN TRIPLE EFECTO (CONTROL MANUAL) REF. TE-M. 2018. 1-62

PROCOLOMBIA. GUÍA DE OPORTUNIDADES COMERCIALES PARA EL SECTOR CÍTRICO OFICINA REGIONAL DE MEDELLÍN. COLOMBIA: 2014. 14-18

PROINDECSA, PROYECTOS Y DELEGACIONES, S.C. TABLAS DE RESISTENCIA QUÍMICA&NBSP; SAN GINES- MURCIA ESPAÑA: 1-10

QUIMINET. PRECIO GLICEROL. MAR 20,. [CONSULTADO EL NOV 10,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.QUIMINET.COM/PRODUCTOS/GLICEROL-1475726529/PRECIOS.HTM](https://www.quiminet.com/productos/glicerol-1475726529/precios.htm)

RANGEL, HERMES AND ARGOTI, ANDRES. CÁLCULO NUMÉRICO DE UN EVAPORADOR QUÍMICO SOBRE UNA HOJA ELECTRÓNICA. EN: REVISTA DE INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. DIC,.VOL. 44, P. 48-55

ROSA, ANTONIO. TIPOS DE VÁLVULAS MÁS COMUNES Y SUS USOS. DIC 1,. [CONSULTADO EL OCT 2,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.GRUPODELPIN.COM/2016/12/01/TIPOS-DE-VALVULAS-MAS-COMUNES-Y-SUS-USOS/](https://www.grupodelpin.com/2016/12/01/tipos-de-valvulas-mas-comunes-y-sus-usos/)

SANTIESTEBAN, INGINIO. SISTEMA DE TRATAMIENTO DE RESIDUALES LÍQUIDOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA COLOMBIANA Y LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO TANA. EN: REVISTA CARIBEÑA DE CIENCIAS SOCIALES. P. 14-18

SCHMALZ. BOMBAS DE VACÍO. [CONSULTADO EL OCT 2,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTPS://WWW.SCHMALZ.COM/ES/SABER-DE-VACIO/EL-SISTEMA-DE-VACIO-Y-SUS-COMPONENTES/GENERADORES-DE-VACIO/BOMBAS-DE-VACIO/](https://www.schmalz.com/es/saber-de-vacio/el-sistema-de-vacio-y-sus-componentes/generadores-de-vacio/bombas-de-vacio/)

SIERRA, EMILIO. NTP 510: VÁLVULAS DE SEGURIDAD: SELECCIÓN. ESPAÑA: 1999. 1-3

SONG, YUHUA AND CHEN, CHAU-CHYUN. SYMMETRIC ELECTROLYTE NONRANDOM TWO-LIQUID ACTIVITY COEFFICIENT MODEL. EN: INDUSTRIAL & ENGINEERING CHEMISTRY RESEARCH. AUGUST 19,.VOL. 48, NO. 16, P. 7788-7797

SYDSA, PRODUCTOS PARA IDENTIFICACIÓN. USO OBLIGATORIO DEL SIGUIENTE EQUIPO: LENTES, TAPONES, GUANTES Y ZAPATO. [CONSULTADO EL NOV 29,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTP://SYDSA.COM/STORE/S2B25-4-USO-OBLIGATORIO-DEL-SIGUIENTE-EQUIPO-LENTE-TAPONES-GUANTES-Y-ZAPATO.HTML](http://SYDSA.COM/STORE/S2B25-4-USO-OBLIGATORIO-DEL-SIGUIENTE-EQUIPO-LENTE-TAPONES-GUANTES-Y-ZAPATO.HTML)

VALVIAS. VÁLVULA DE AGUJA - VALVIAS. [CONSULTADO EL OCT 2,2018]. DISPONIBLE EN: [HTTP://WWW.VALVIAS.COM/TIPO-VALVULA-DE-AGUJA.PHP](http://WWW.VALVIAS.COM/TIPO-VALVULA-DE-AGUJA.PHP)

VAPASSA. INDICADORES DE NIVEL – VAPASA. 2018.


VAZQUEZ-ROJAS, RAUL A.; GARFIAS-VÁSQUEZ, FRANCISCO J. AND BAZUARUEDA, ENRIQUE R. SIMULATION OF A TRIPLE EFFECT EVAPORATOR OF A SOLUTION OF CAUSTIC SODA, SODIUM CHLORIDE, AND SODIUM SULFATE USING ASPEN PLUS. EN: COMPUTERS AND CHEMICAL ENGINEERING. APR 6,.VOL. 112, P. 265-273

VOGEL, HENRY C. AND TODARO, CELESTE M. 12.5.8 PLATE EVAPORATORS. EN: ANONYMOUS FERMENTATION AND BIOCHEMICAL ENGINEERING HANDBOOK - PRINCIPLES, PROCESS DESIGN, AND EQUIPMENT (3RD EDITION). ELSEVIER,

# **ANEXOS**


ANEXO A

SISTEMA DE DOCUMENTAL PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL TREN DE EVAPORACIÓN FUA

	<b>Lista de chequeo tren de evaporación</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: LDC-01</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 1 de 2</b>

<b>Válvulas</b>				<b>Bombas</b>			
<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cumple</i>		<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cumple</i>	
		<i>Si</i>	<i>No</i>			<i>Si</i>	<i>No</i>
Cheque	33			Centrifuga	2		
Alivio	6			Dosificadora	3		
<Globo	10			Total	5		
Bola	93			<b>Tanques</b>			
Aguja	1			<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cumple</i>	
compuerta	4					<i>Si</i>	<i>No</i>
				Alimento	1		
				Condensado	5		
				Concentrado	1		
				Total	7		




	<b>Lista de chequeo tren de evaporación</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: LDC-01</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 1 de 2</b>

<b>Accesorios</b>				<b>Evaporadores</b>			
<i>componente</i>	<i>cantidad</i>	<i>Cumple</i>		<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cumple</i>	
		<i>Si</i>	<i>No</i>			<i>Si</i>	<i>No</i>
Ciclón	3			Chaqueta	1		
Trampa de vapor	4			Calandria vertical	1		
Dosificadores	4			Calandria horizontal	1		
Balanza	7			Intercambiador de calor	2		
Amortiguador de pulsaciones	3			<b><i>Instrumentos de medición</i></b>			
Visor de condensación	1			<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cumple</i>	
						<i>Si</i>	<i>No</i>
<b><i>Instrumentos de medición</i></b>				Mirilla de vidrio	10		
<i>Componente</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Cumple</i>		Indicador de temperatura	12		
		<i>Si</i>	<i>No</i>				
Controlador de nivel	4			Rotámetros	4		
Indicador de presión	12			Tablero de control	1		

ANEXO B

LISTA DE CHEQUEO ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE BOMBAS

	<b>VERIFICACIÓN DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BOMBAS</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: LDC-02</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 1 de 1</b>


Bombas	Flujo máx. (m <sup>3</sup> /h)	Cumple		Presión (Psi)	Cumple		Potencia (kW)	Cumple	
		Si	No		Si	No		Si	No
Dosificadoras producto	0.03			50			0.23		
Bomba de vacío	4.2			2.18			0.145		
Centrifuga	2.4			87			0.5		


Bombas	Material	Cumple		D succión	Cumple		D descarga	Cumple	
		Si	No		Si	No		Si	No
Dosificadoras producto	SS 316			¼" NPT			¼" NPT		
Bomba de vacío	SS 304			½" NPT					
Centrifuga	SS 304			1" NPT			1" NPT		


Fuente: Corredor, E. (2018). Especificaciones técnicas TREN EVAPORADORES. (). Bogotá, Colombia: Retrieved from [https://drive.google.com/drive/folders/1gV2CeBVXpVZGy2p75O\\_8i-vKpNk0ouCp](https://drive.google.com/drive/folders/1gV2CeBVXpVZGy2p75O_8i-vKpNk0ouCp)

ANEXO C

LISTA DE VERIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE MEDICIÓN INSTALADOS EN EL TREN DE EVAPORACIÓN.<sup>73</sup>


	<b>VERIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE MEDICIÓN</b>		<b>VERSIÓN 01</b>		
	<b>CÓDIGO: LDC-03</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>		
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 1 de 3</b>		
<b>Medidores de masa</b>					
<b>Medidores de masa</b>	<b>Descripción</b>			<b>Cumple</b>	
MI-01	Masa tanque de alimento.			Si	No
MI-02	Masa tanque vapor condensado evaporador calandria vertical.				
MI-03	Masa tanque vapor condensado evaporador calandria horizontal.				
MI-04	Masa tanque vapor condensado evaporador chaqueta.				
MI-05	Masa tanque vapor condensado evaporador circulación forzada.				
MI-06	Masa tanque de producto concentrado.				
MI-07	Masa tanque de condensados.				


	<b>VERIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE MEDICIÓN</b>		<b>VERSIÓN 01</b>		
	<b>CÓDIGO: LDC-03</b>		<b>EMISIÓN: 20/11/2018</b>		
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 2 de 3</b>		
<b>Medidores de temperatura</b>					
<b>Medidores de temperatura</b>	<b>Descripción</b>			<b>Cumple</b>	
TI-01	Temperatura tanque de alimento			Si	No
TI-02	Temperatura en el evaporador de calandria vertical				
TI-03	Temperatura vapor condensado evaporador calandria vertical				
TI-04	Temperatura en el evaporador de calandria horizontal				
TI-05	Temperatura vapor condensado evaporador calandria horizontal				
TI-06	Temperatura en el evaporador de chaqueta				
TI-07	Temperatura vapor condensado evaporador de chaqueta				
TI-08	Temperatura en la salida del evaporador de circulación forzada				
TI-09	Temperatura vapor condensado evaporador de circulación forzada				
TI-10	Temperatura a la entrada del condensador				
TI-11	Temperatura a la salida del condensador				
TI-12	Temperatura en el tanque de producto				
TI-05	Temperatura vapor condensado evaporador calandria horizontal				


	<b>VERIFICACIÓN DE ELEMENTOS DE MEDICIÓN</b>		<b>VERSIÓN 01</b>		
	<b>CÓDIGO: LDC-03</b>		<b>EMISIÓN: 20/11/2018</b>		
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 3 de 3</b>		
<b>Medidores de presión</b>					
<b>Medidores de presión</b>	<b>Descripción</b>			<b>Cumple</b>	
				Si	No
PI-01	Presión de la línea de vapor vivo que se alimenta a todo el proceso				
PI-02	Presión del vapor alimentado al evaporador de calandria vertical				
PI-03	Presión en el evaporador de calandria vertical				
PI-04	Presión de la línea de descarga de la bomba P-102				
PI-05	Presión del vapor alimentado al evaporador de calandria horizontal				
PI-06	Presión en el evaporador calandria horizontal				
PI-07	Presión de la línea de descarga de la bomba P-103				
PI-08	Presión del vapor alimentado al evaporador de chaqueta				
PI-09	Presión en el evaporador de chaqueta				
PI-10	Presión de la línea de descarga de la bomba P-104				
PI-11	Presión del vapor alimentado al evaporador de circulación forzada				
PI-12	Presión en el tanque de condensados				

ANEXO D

LISTA DE VERIFICACIÓN EVAPORADORES

	<b>ESPECIFICACIONES EVAPORADORES</b>		<b>VERSIÓN 01</b>	
	<b>CÓDIGO: LDC-04</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>	
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 1 de 2</b>	
<b>EVAPORADOR DE CHAQUETA</b>				
Especificaciones		Valor	Cumple	
			Si	No
Material de construcción		ACERO 304		
Capacidad		17 l		
Altura		1 m		
Diámetro		0.25 m		
<b>EVAPORADOR DE CALANDRIA VERTICAL</b>				
Especificaciones		Valor	Cumple	
			Si	No
Material de construcción		ACERO 304		
Altura	Sistema transferencia	0.4 m		
	Sistema de separación	0.6 m		
Diámetro Total		0.25 m		
Tubos	Diámetro	1 in		
	Número	12		
	Longitud	25 cm		
Tubo retorno central	Diámetro	4 in		

	<b>ESPECIFICACIONES EVAPORADORES</b>		<b>VERSIÓN 01</b>	
	<b>CÓDIGO: LDC-04</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>	
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 2 de 2</b>	
<b>EVAPORADOR DE CALANDRIA HORIZONTAL</b>				
Especificaciones		Valor	Cumple	
			Si	No
Material de construcción		ACERO 304		
Altura	Sistema transferencia	0.4 m		
	Sistema de separación	0.6 m		
Diámetro Total		0.25 m		
Tubos	Diámetro	1 in		
	Número	12		
	Longitud	25 cm		

	<b>ESPEFICACIONES TECNICAS EQUIPOS SECUNDARIOS</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: GDV-01</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 1 de 9</b>

## ANEXO E

### FICHA TÉCNICA TRAMPA DE VAPOR

<b>Condiciones de trabajo</b>	<b>Valor</b>
Presión máxima admisible	63 bar a 120°C
Temperatura mínima admisible	0°C
Temperatura máxima admisible	425°C
Temperatura máxima de trabajo	400°C a 43 bar
Presión máxima de trabajo para vapor saturado	52 bar
Presión diferencial mínima para buen funcionamiento	0.25 bar

Fuente: GENE S.A. (2018). *ARTICULO: 2284N trampa de vapor termodinámica (sin filtro) thermodynamic steam trap (without strainer)*. (). Barcelona, España: Retrieved from [https://drive.google.com/drive/folders/1qV2CeBVXpVZGy2p75O\\_8i-vKpNk0ouCp](https://drive.google.com/drive/folders/1qV2CeBVXpVZGy2p75O_8i-vKpNk0ouCp)


## ANEXO F

### ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ROTÁMETROS

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
Rango de medición	Hasta 216.6 cm <sup>3</sup> / min agua
Máxima temperatura de trabajo	121°C
Presión máxima de trabajo	200 psig
Exactitud	± 2% de la escala total
Repetibilidad	±0.25% de la escala total

Fuente: OMEGA. *65 AND 150 MM ROTAMETERS featuring new design with easy tube replacement and superior readability*. (). Retrieved from [https://drive.google.com/drive/folders/1qV2CeBVXpVZGy2p75O\\_8i-vKpNk0ouCp](https://drive.google.com/drive/folders/1qV2CeBVXpVZGy2p75O_8i-vKpNk0ouCp)



	<b>ESPECIFICACIONES TÉCNICAS EQUIPOS SECUNDARIOS</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: GDV-01</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 2 de 9</b>

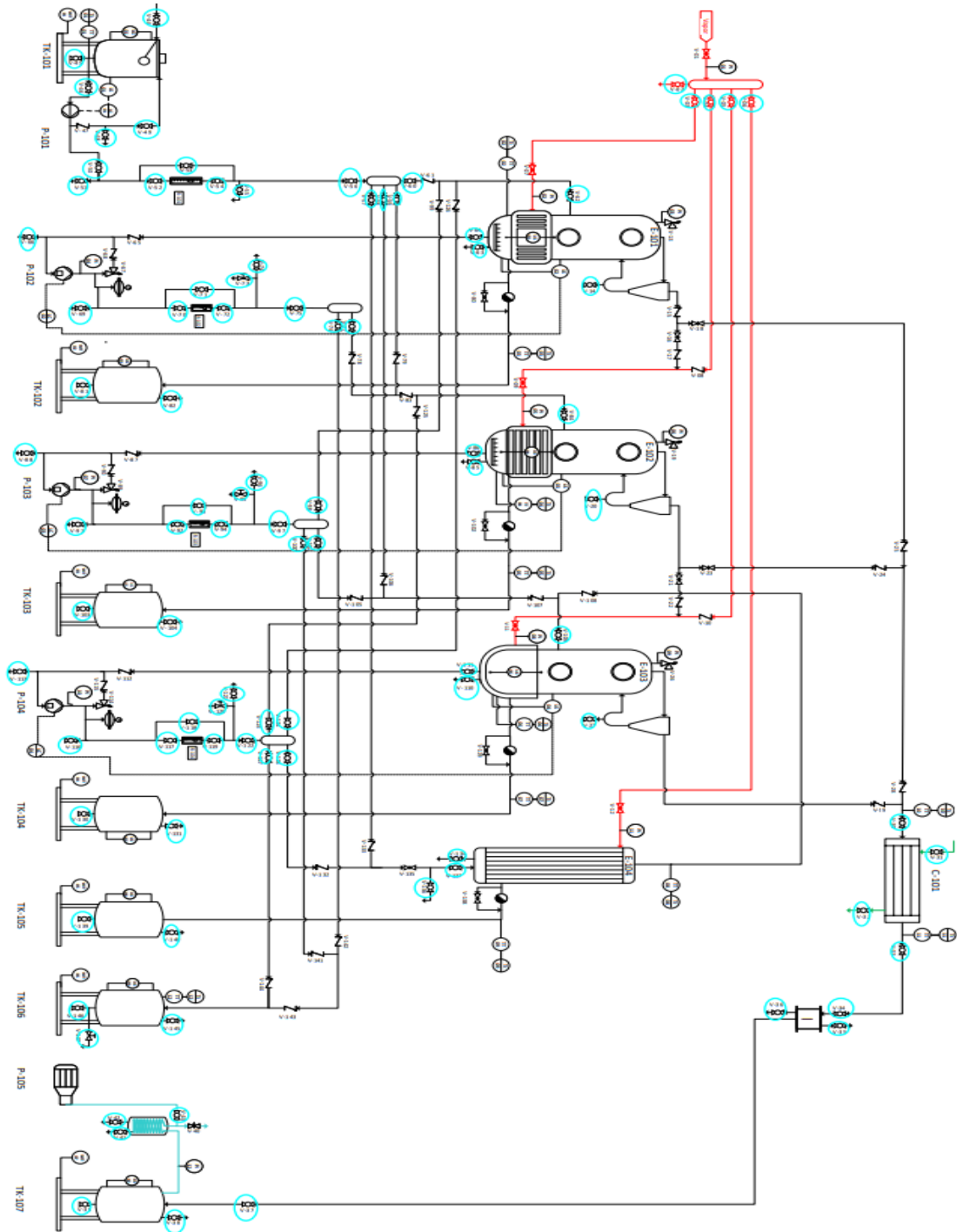
**ANEXO G**

**FICHA TÉCNICA VÁLVULAS DE ALIVIO**

<b>Componentes</b>	<b>Material</b>	<b>Especificación ASTM</b>
Cuerpo	316 S.S.	A182
Junta	316 S.S. cubierto con PTFE	A240
Asiento	316 S.S.	A479
Disco	316 S.S. adherido a fluorocarburo FKM	A479
Vástago	316 S.S.	A479
O-ring 1	fluorocarburo FKM	-
O-ring 2	fluorocarburo FKM	-
Anillo de respaldo	PTFE	-
Cubierta protectora	316 S.S.	A479
Soporte de resorte	316 S.S.	A476
Tuerca de seguridad	316 S.S.	A476
Tapa	316 S.S.	A479
Etiqueta	Poliéster	
Resorte	S17700 S.S	AMS 5678
Tapón	316 S.S	A276

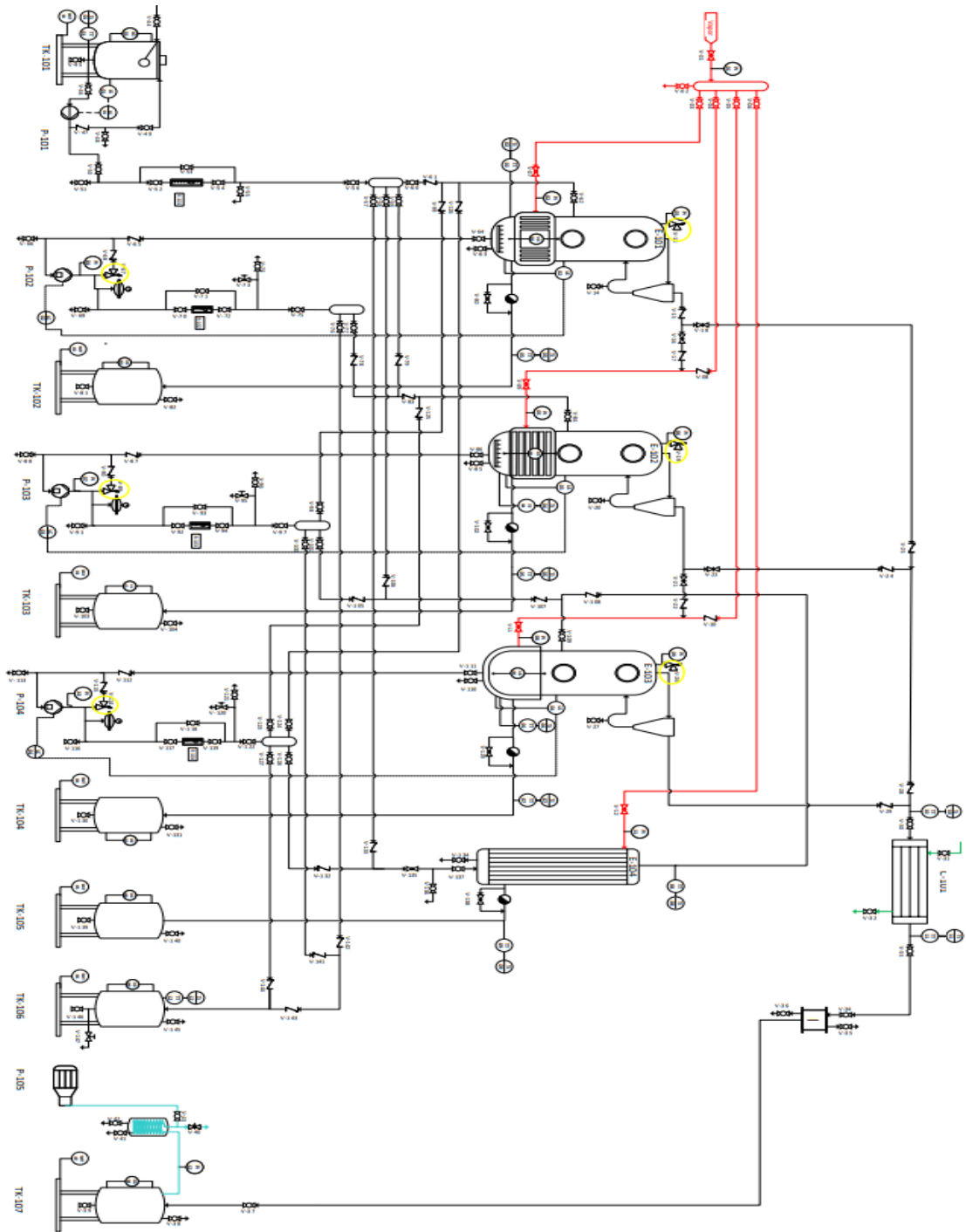
Fuente: Corredor, E. (2018). *Información tren de evaporadores.* (). Bogotá, Colombia: Retrieved from [https://drive.google.com/drive/folders/1gV2CeBVXpVZGy2p75O\\_8i-vKpNk0ouCp](https://drive.google.com/drive/folders/1gV2CeBVXpVZGy2p75O_8i-vKpNk0ouCp)

## ANEXO H UBICACIÓN VÁLVULAS DE BOLA



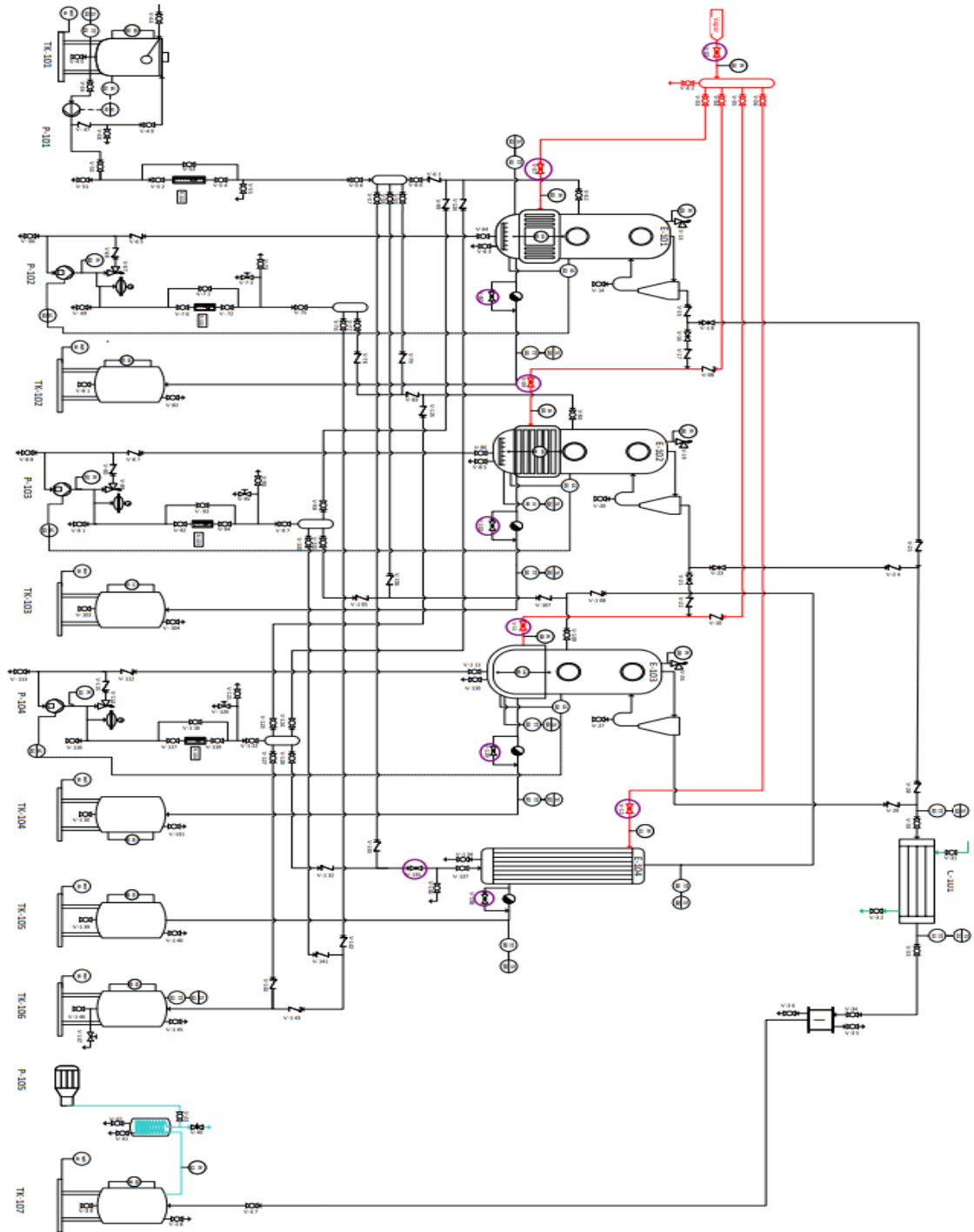
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

ANEXO I  
UBICACIÓN VÁLVULAS DE ALIVIO



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

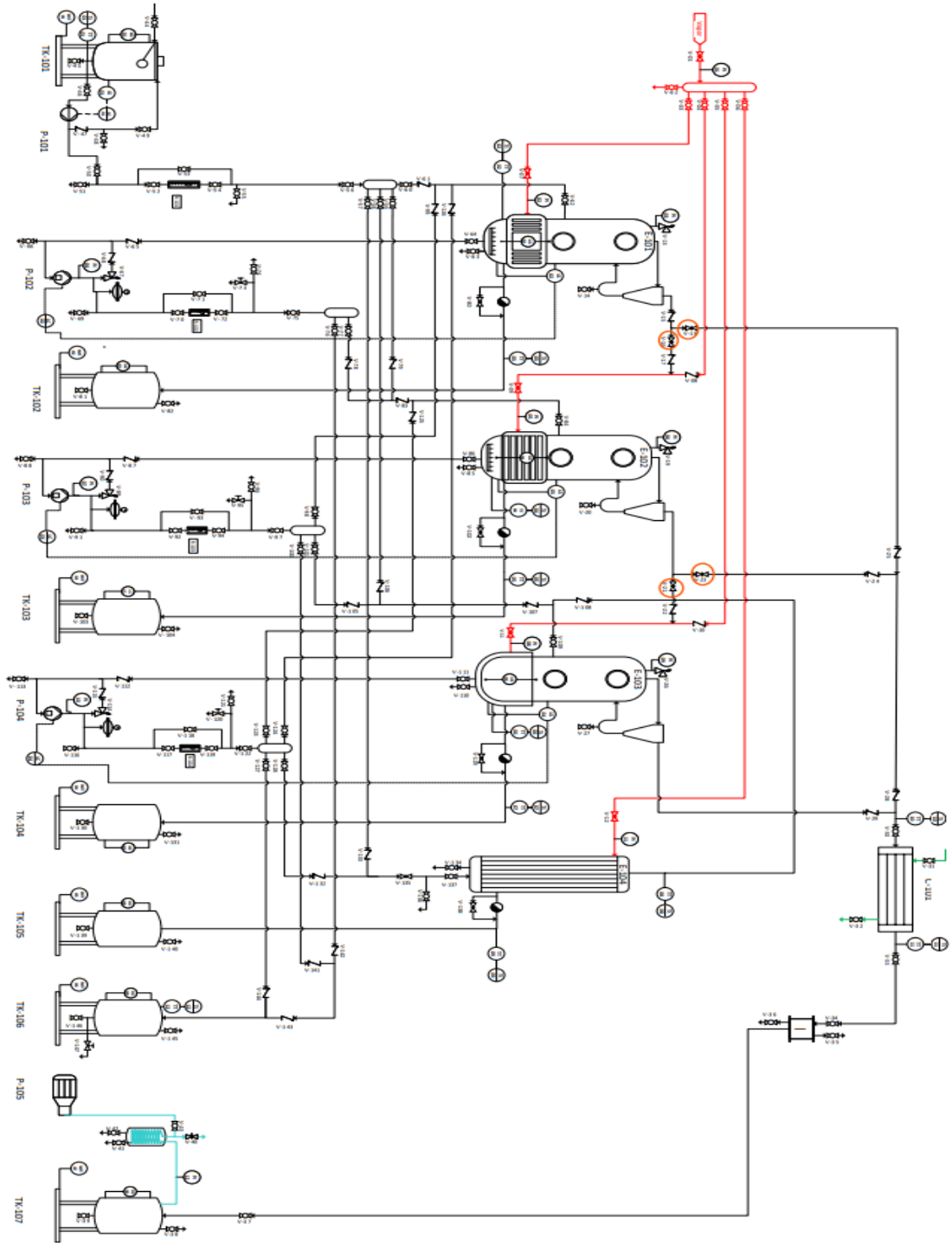
## ANEXO J UBICACIÓN VÁLVULAS DE GLOBO



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

# ANEXO K

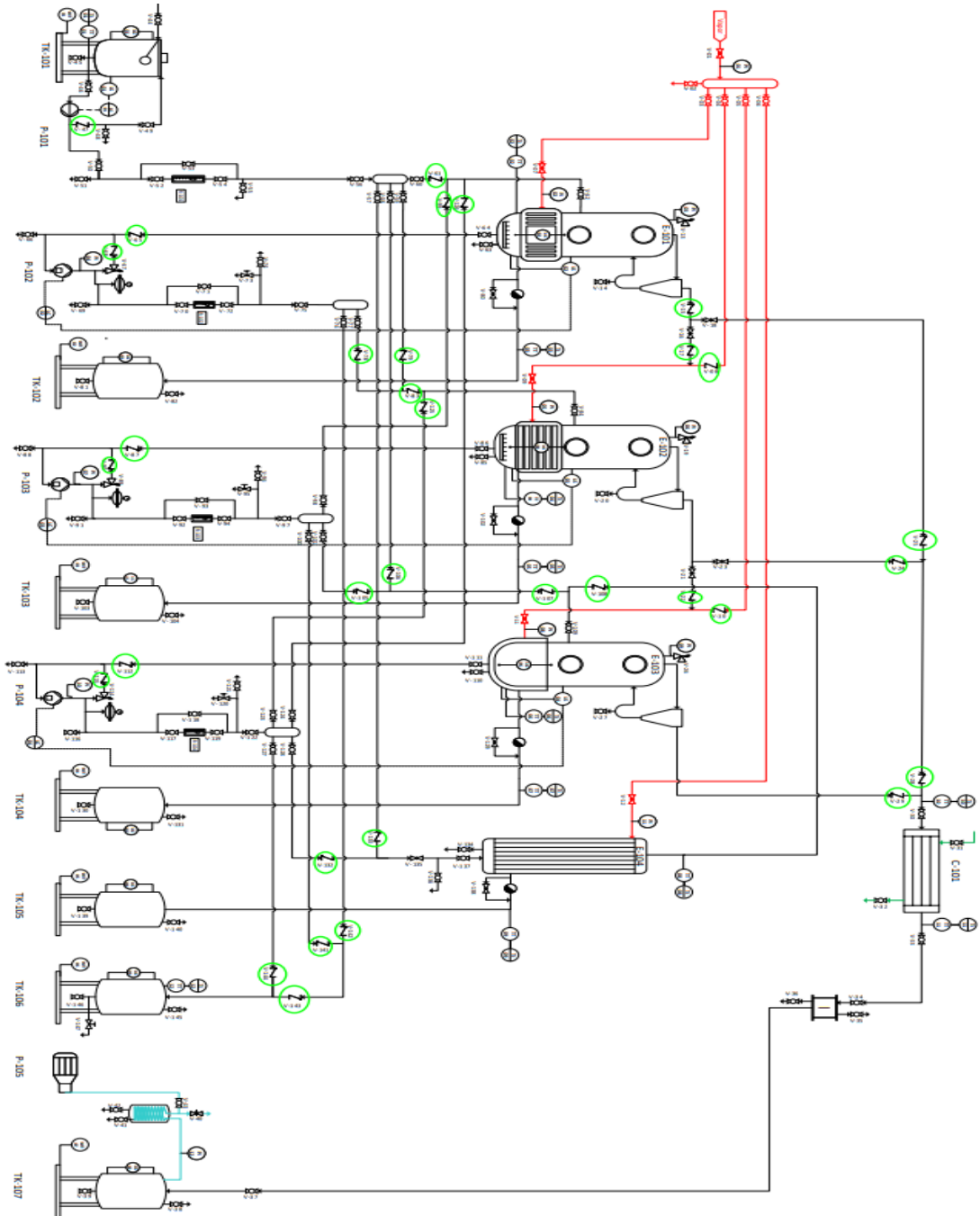
## UBICACIÓN VÁLVULAS DE COMPUERTA



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

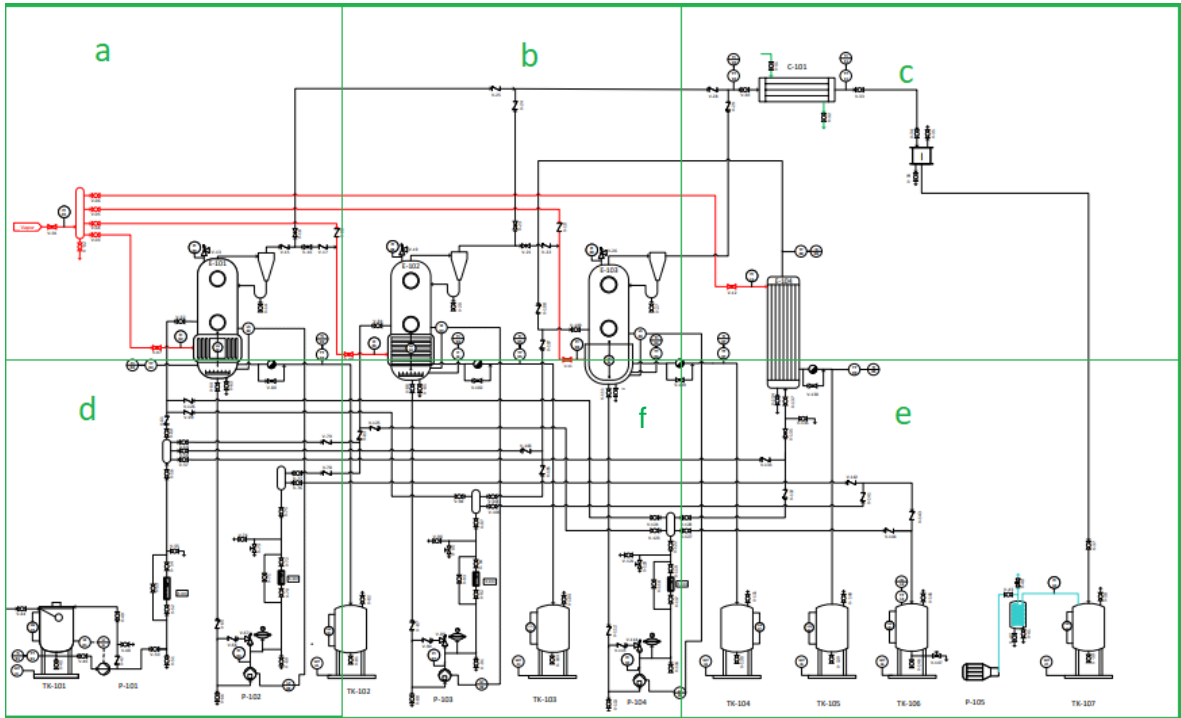
# ANEXO L

## UBICACIÓN VÁLVULAS DE CHEQUE



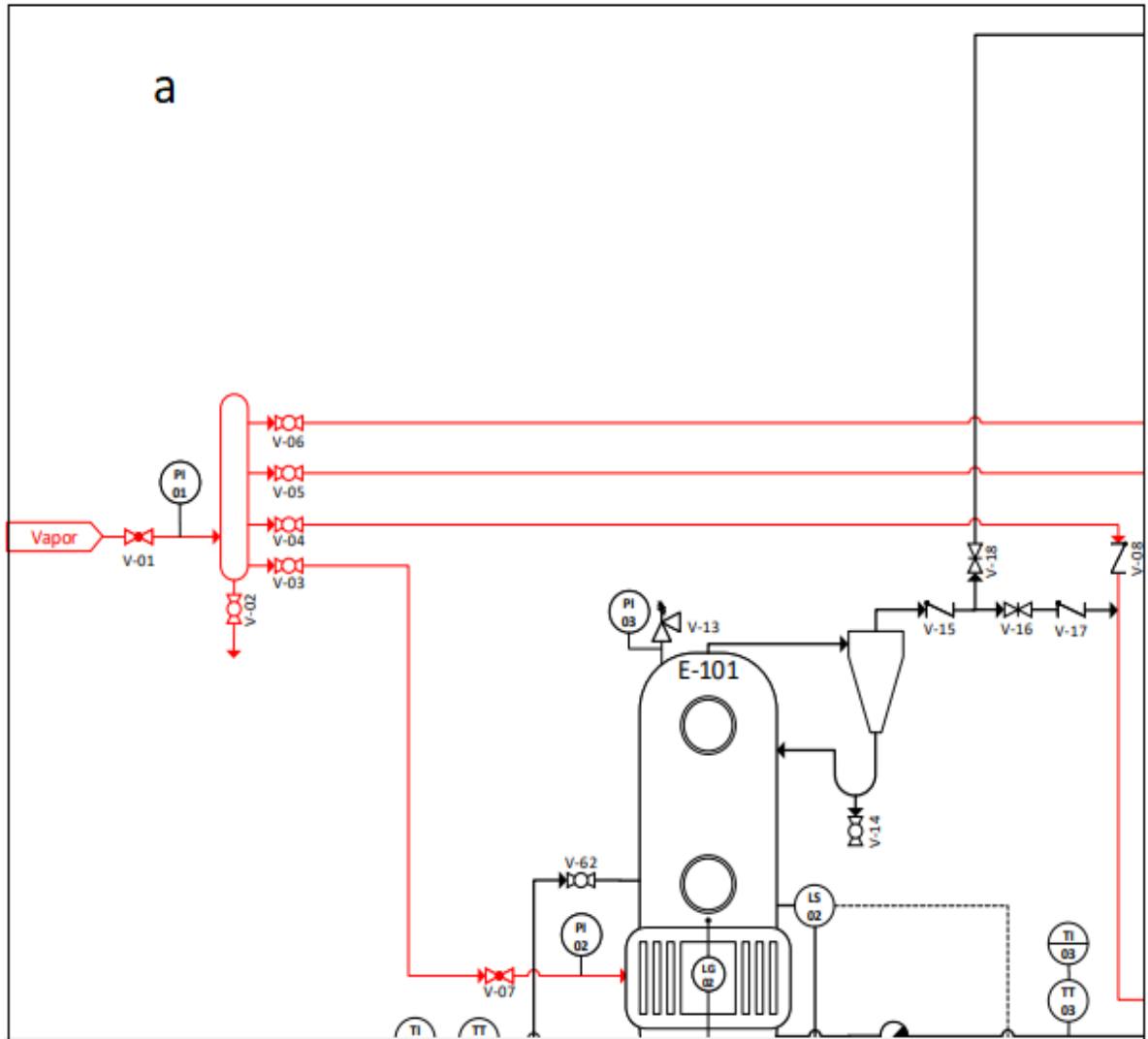
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

ANEXO M  
PFD TREN DE EVAPORACIÓN



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

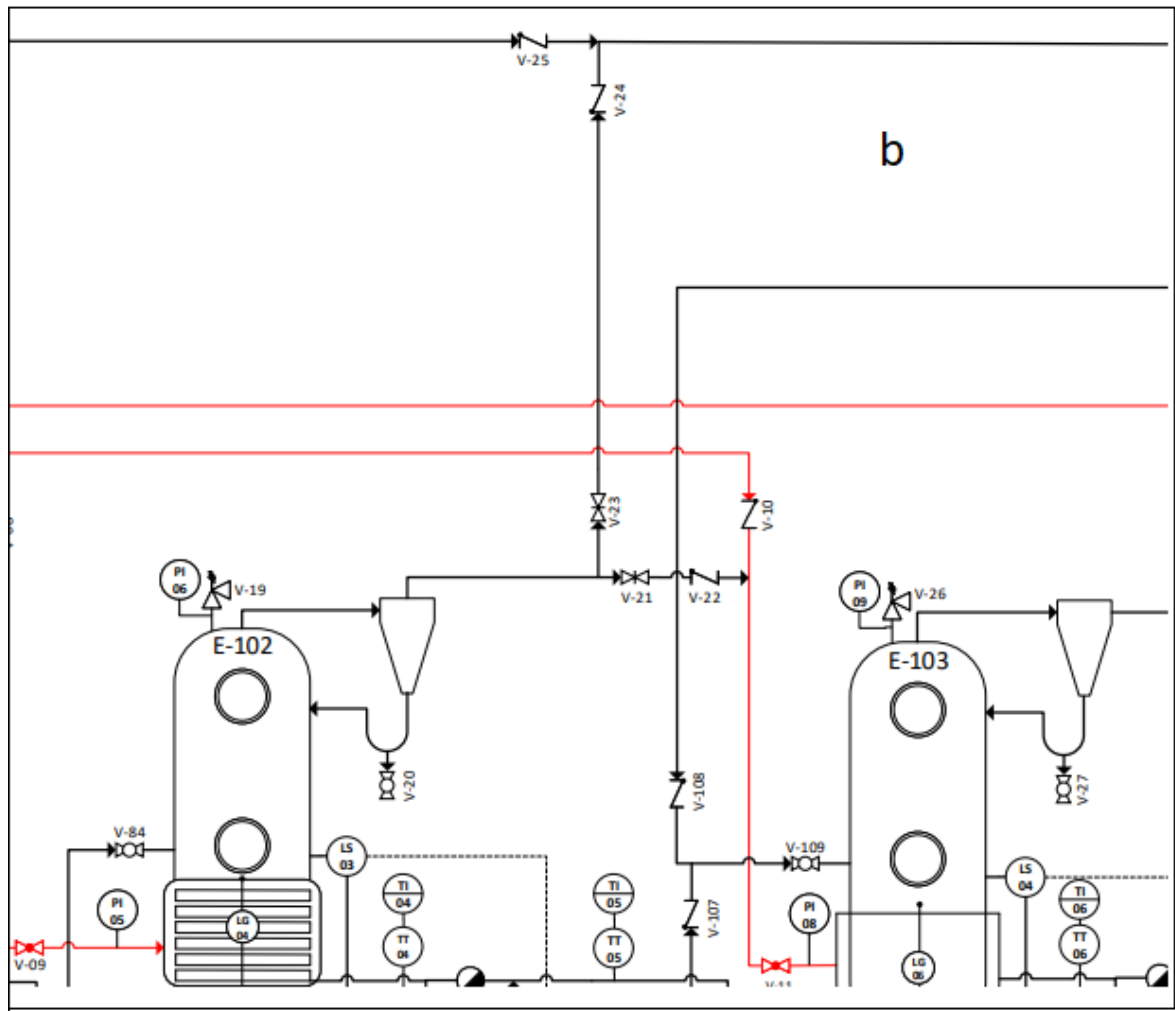
ANEXO N  
PFD TREN DE EVAPORACIÓN SECCIÓN A



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

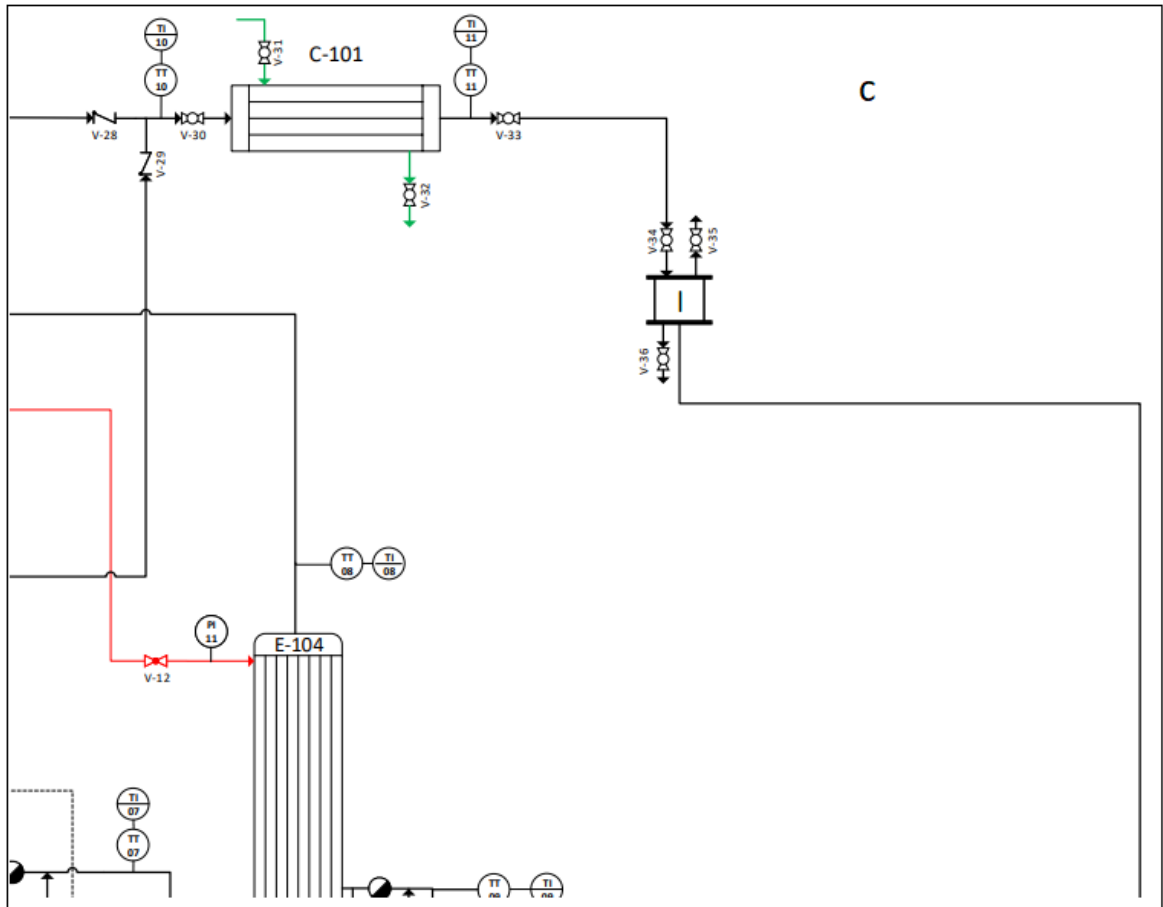


ANEXO O  
PFD TREN DE EVAPORACIÓN SECCIÓN B



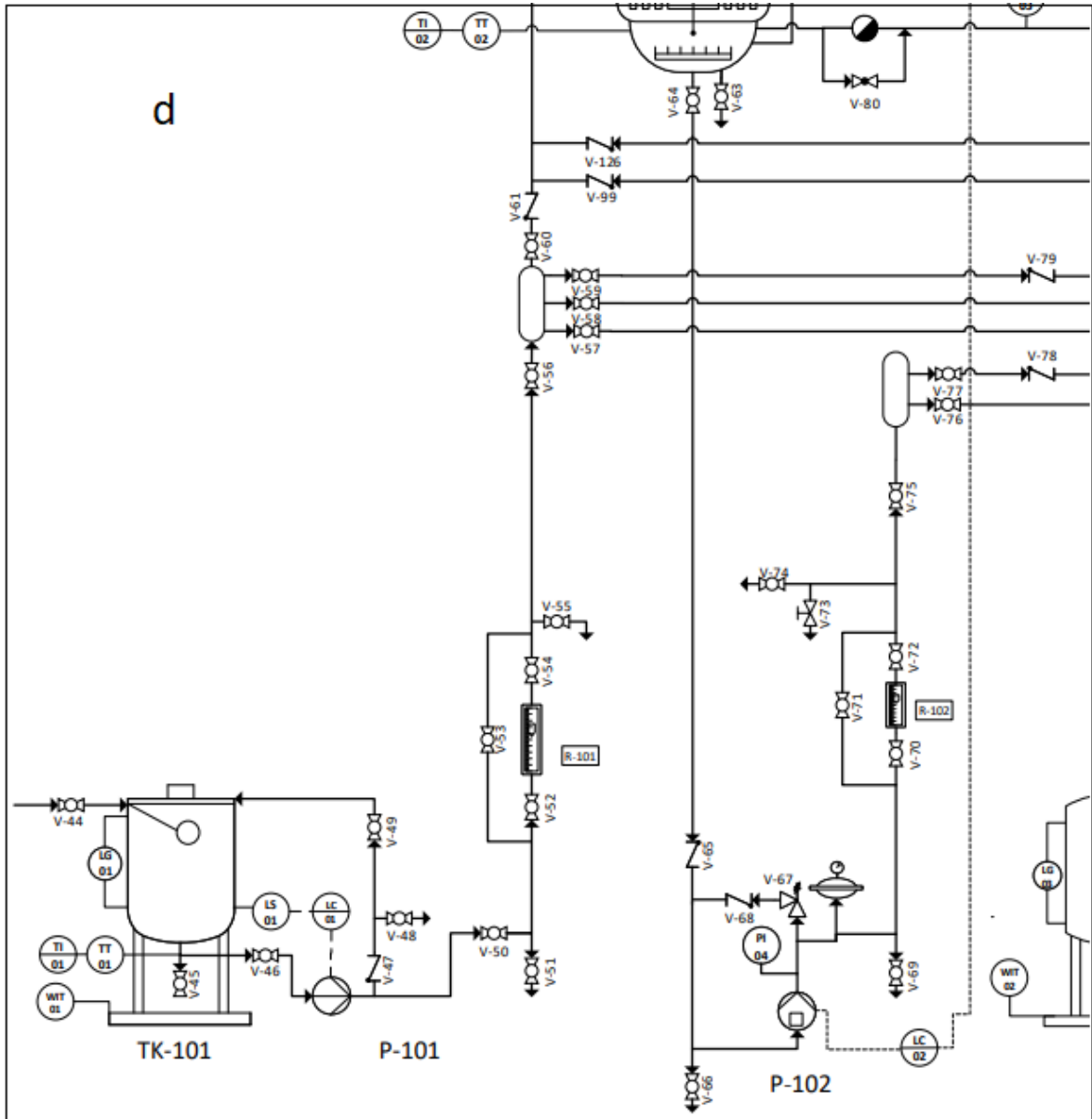
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

ANEXO P  
PFD TREN DE EVAPORACIÓN SECCIÓN C



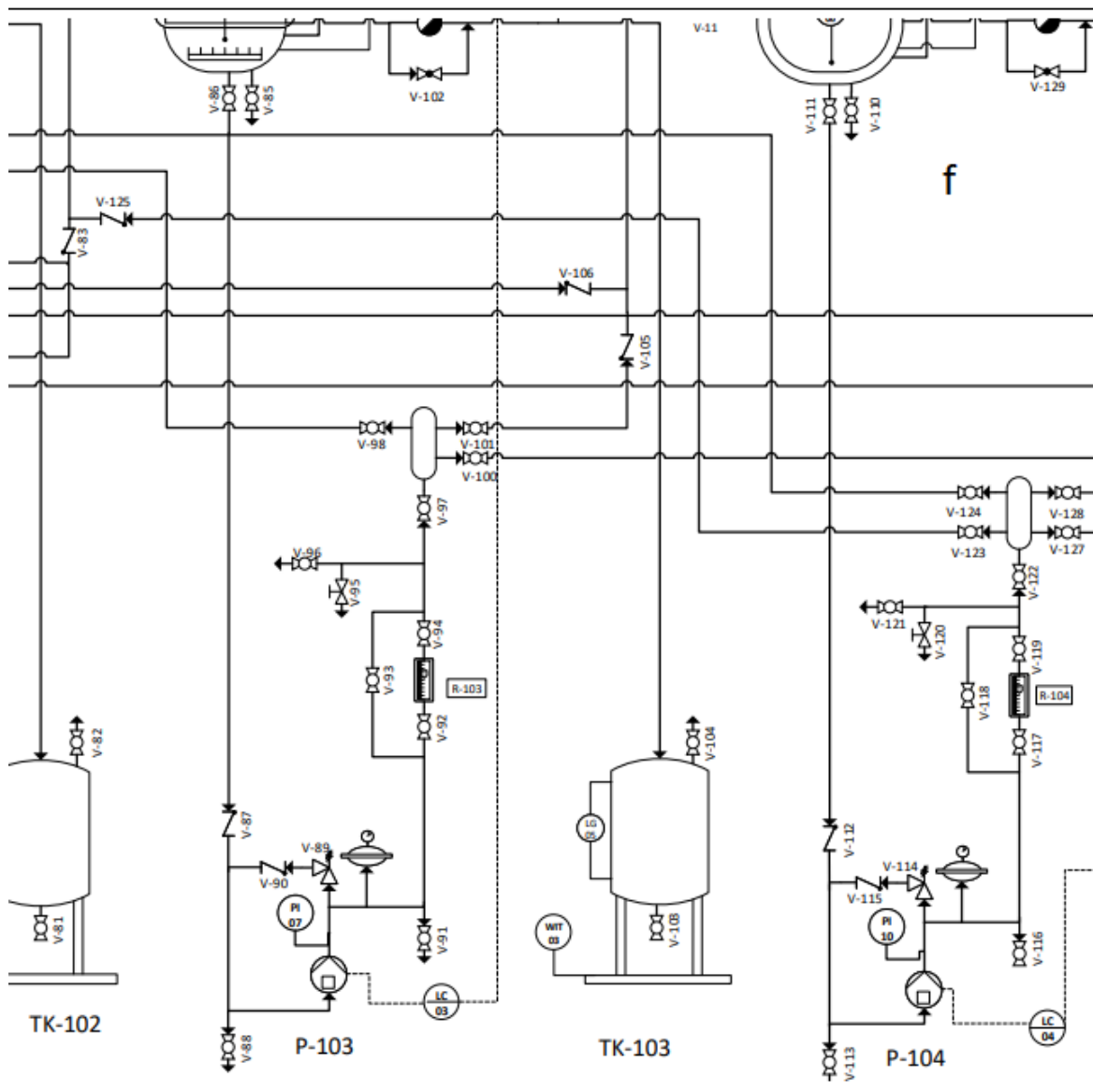
Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

ANEXO Q  
PFD TREN DE EVAPORACIÓN SECCIÓN D



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

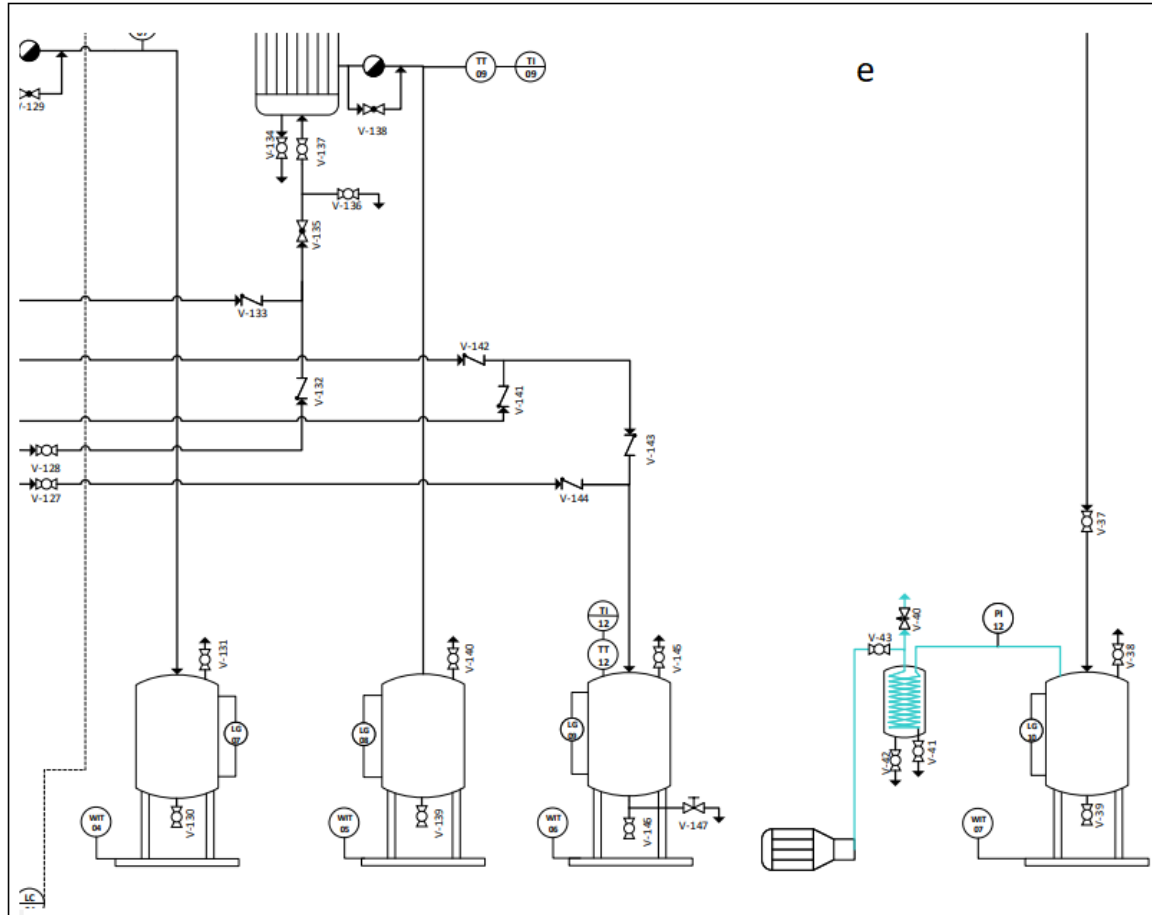
ANEXO R  
PFD TREN DE EVAPORACIÓN SECCIÓN F




Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

## ANEXO S

### PFD tren de evaporación sección e































Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62


	<b>ESPECIFICACIONES TECNICAS EQUIPOS SECUNDARIOS</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO:</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 8 de 9</b>

*ANEXO N*

*NOTAS PFD TREN DE EVAPORACIÓN*

<p><b>NOTAS</b></p> <p><b>ABREVIATURAS</b></p> <p>C - Condensador E - Evaporador P - Bomba R - Rotámetro TK - Tanque</p> <p><b>LÍNEAS DE PROCESO</b></p> <p>— Proceso — Agua de servicio — Vapor vivo — Vacío</p> <p><b>VÁLVULAS</b></p> <table border="0"> <tr> <td> Válvula de bola</td> <td> Válvula de alivio</td> </tr> <tr> <td> Válvula de globo</td> <td> Válvula de aguja</td> </tr> <tr> <td> Válvula de cheque</td> <td> Válvula de compuerta</td> </tr> </table>	 Válvula de bola	 Válvula de alivio	 Válvula de globo	 Válvula de aguja	 Válvula de cheque	 Válvula de compuerta	<p><b>INSTRUMENTACIÓN</b></p> <p> Indicador de temperatura</p> <p> Transductor de temperatura</p> <p> Indicador de presión</p> <p> Controlador de nivel</p> <p> Interruptor de nivel</p> <p> Transmisor-indicador de masa</p> <p> Indicador de nivel tipo caldera</p> <p><b>OTROS</b></p> <p> Distribuidor de flujo-marrano</p> <p> Visor de condensación</p> <p> Trampa de vapor</p> <p> Rotámetro</p> <p> Ciclón</p> <p> Amortiguador de pulsaciones</p> <p> Trampa de vacío</p>
 Válvula de bola	 Válvula de alivio						
 Válvula de globo	 Válvula de aguja						
 Válvula de cheque	 Válvula de compuerta						

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62


	<b>ESPECIFICACIONES TECNICAS EQUIPOS SECUNDARIOS</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO:</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Página: 9 de 9</b>

**ANEXO O**

**IDENTIFICACIÓN DE INSTRUMENTOS DEL TREN DE EVAPORACIÓN**

<b>Identificación de instrumentos</b>	<b>Nombre</b>
TK-101	Tanque de alimento
E-101	Evaporador calandria vertical
TK-102	Tanque vapor vivo condensado desde evaporador E-101
E-102	Evaporador calandria horizontal
TK-103	Tanque vapor vivo condensado desde evaporador E-102
E-103	Evaporador de chaqueta
E-104	Evaporador circulación forzada
TK-105	Tanque vapor vivo condensado desde evaporador E-104
P-105	Bomba de vacío
P-101	Bomba centrífuga Alimentación
P-102	Bomba dosificadora Producto evaporador E-101
P-103	Bomba dosificadora Producto evaporador E-102
P-104	Bomba dosificadora producto evaporador E-103
TK-104	Tanque vapor vivo condensado desde evaporador E-103
C-101	Condensador Tipo tubos y coraza
TK-106	Tanque producto
TK-107	Tanque condensado

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

	<b>SELECCIÓN DE SUSTANCIA AEVAPORAR</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: GSS-01</b>		<b>EMISIÓN: 20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Páginas: 20</b>

*ANEXO P*

*COMPATIBILIDAD DE SUSTANCIAS QUÍMICAS CON MATERIAL  
FABRICACIÓN TREN EVAPORACIÓN*

<i>sustancia Química</i>	<i>ACERO INOX 304</i>	<i>PTFE (Teflón)</i>	<i>EPDM</i>	<i>Uso</i>
<b>ACEITES</b>				
Anilina	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Ballena	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Cacahuete	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Cachalote	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Canela	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Castor	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Cereal	sin efecto	sin efecto	moderado	NO USAR
Cítrico	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Clavo	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Coco	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Colza	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Creosota	Menor	sin efecto	severo	NO USAR
Curtidos	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Diesel Fuel (20,30,40,50)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Fuel (1,2,3,5A,5B,6)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Gengibre	Severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Glicina	sin efecto	sin efecto	moderado	NO USAR
Hidráulico (Petroleo)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Hidráulico (Sintético)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Hígado de bacalao	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Laurel	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Limón	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Linaza	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR



Matalauva	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Menta	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Mineral	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Naranja	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Oliva	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Palma	Sin efecto	Sin efecto	Sin efecto	USAR
Piña	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Resina	sin efecto hasta 22°C		N/D	NO USAR
Semilla de algodón	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Semilla de Sésamo	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Silicona	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Transformador	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Turbina	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Acetaldehído	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Acetamida	Menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Acetato, Disolvente	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Acético, ácido	Severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Acético, ácido 20%	Menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Acético, ácido 80%	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Acético, ácido glacial	moderado	sin efecto	menor	NO USAR
Acético, anhídrido	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Acetil, bromuro	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Acetil, cloruro (seco)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Acetileno	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Acetona	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Acrilonitrilo	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Adípico, ácido	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Agua, ácida, mina	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Agua blanca	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Agua, de mar	moderado	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Agua, desionizada	severo	sin efecto hasta 48°C	menor hasta 22°C	NO USAR
Agua, destilada	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Agua Regia (80% HCl,20% HNO3)	severo	sin efecto	moderado	NO USAR
Agua, salada	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR

<b>ALCOHOLES</b>				NO USAR
Amyl	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Benzil	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Butil	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Diacetona	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Etil	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Hexil	sin efecto	sin efecto	moderado	NO USAR
Isobutil	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Isopropil	menor	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Metil	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Octil	sin efecto	N/D	sin efecto	NO USAR
Propil	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Almidón	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Aluminio, cloruro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Aluminio, Cloruro 20%	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Aluminio, Fluoruro	Severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Aluminio, Hidróxido	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Aluminio, Nitrato	sin efecto	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Aluminio Potasio, Sulfato 10%	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Aluminio Potasio, Sulfato 100%	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Aluminio, Sulfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Alumbres	N/D	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Aminas	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	menor	NO USAR
Amoniaco 10%	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Amoniaco, Anhídrido	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Amoniaco, líquido	menor hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amoniaco, Nitrato	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Amonio, Acetato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Bifluoruro	severo	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Amonio, Carbonato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Caseinato	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Amonio, Cloruro	moderado	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Amonio, Fosfato, Dibásico	menor	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Amonio, Fosfato, Monobásico	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Fosfato, Tribásico	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Hidróxido	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Nitrato	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Oxalato	sin efecto	N/D	sin efecto	NO USAR
Amonio, Persulfato	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	menor	NO USAR
Amonio, Sulfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amonio, Sulfito	menor	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Amonio, Thiosulfato	N/D	N/D	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Amylo, Acetato	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Amylo, Alcohol	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Amylo, Cloruro	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Anilina	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Anilina, Hidrocloruro	severo	sin efecto	menor	NO USAR
Anticongelante	N/D	N/D	sin efecto	NO USAR
Antimonio, Tricloruro	severo	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Aroclor 1248	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Aromáticos, Hidrocarbones	N/D	N/D	severo	NO USAR
Arsénico, Acido	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Arsénico, Sales	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Asfalto	menor	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Azúcar de remolacha (líquido)	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Azúcar (líquidos)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Azufre, cloruro	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Azufre, dióxido	severo	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR

Azufre, dióxido (seco)	severo	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Azufre, hexafluoruro	N/D	N/D	menor	NO USAR
Azufre, trióxido	sin efecto	sin efecto	moderado hasta 48°C	NO USAR
Azufre, trióxido (seco)	severo	sin efecto	moderado hasta 22°C	NO USAR
<b>BAÑOS DE RECUBRIMIENTO</b>				NO USAR
Antimonio 55 ° C	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Arsénico 44 ° C	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE BRONCE:</b>				NO USAR
Baño Cu-Cd R.T.	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Baño Cu-Sn 71 ° C	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Baño Cu-Zn 38 ° C	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE CADMIO:</b>				NO USAR
Baño de cianuro 32 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑOS DE RECUBRIMIENTO</b>				NO USAR
Baño crómico-sulfúrico 55 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño fluoruro 55 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño fluosilicato 35 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE COBRE (CIANURO):</b>				NO USAR
Baño golpe de cobre 50 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño alta velocidad 82 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño Sal de Rochelle 66 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE COBRE (ACIDO):</b>				NO USAR
Baño fluoborato cobre 50 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño R.T. sulfato de cobre	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE COBRE (Misc.)</b>				NO USAR
Pirofosfato de cobre	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Cobre (electroless)	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE ORO:</b>				NO USAR
Acido 24 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Cianuro 66 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR

Neutro 24 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño de indium sulfamato r.t.	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE HIERRO:</b>				NO USAR
Baño Am sulfato ferroso 65 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño Cloruro ferroso 88 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño sulfato ferroso 65 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño fluoborato 63 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Sulfamato 60 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño cloruro sulfamato 71 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño de fluoborato plomo	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE NIQUEL:</b>				NO USAR
Electroless 93 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Fluoborato 38-77 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Cloruro Alto 55-71 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Sulfamato 38-60 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Tipo Watts 46-71 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño de rodio 50 ° C	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Baño de plata 27-49 ° C	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Baño de fluoborato estaño 38°C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
baño de estaño/plomo 38 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
<b>BAÑO DE ZINC:</b>				NO USAR
Cloruro Acido 60 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño R.T. Fluoborato ácido	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño Sulfato ácido 66 ° C	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Baño R.T. Cianuro alcalino	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Bario, Carbonato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Bario, cianuro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Bario, cloruro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Bario, hidróxido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Bario, nitrato	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Bario, sulfato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Bario, sulfuro	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Barnices	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Benceno	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Benceno, ácido sulfónico	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Benzaldehído	menor	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Benzil, cloruro	moderado hasta 22°C	N/D	severo	NO USAR
Benzoico, ácido	menor	sin efecto hasta 48°C	severo	NO USAR
Benzol	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Benzonitrilo	severo	sin efecto hasta 48°C	N/D	NO USAR
Blanqueamiento, licores de	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Borax (borato de sodio)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Bórico, ácido	menor hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Bromo	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Butadieno	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	moderado	NO USAR
Butano	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Butanol (alcohol de butil)	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Butil, Acetato	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Butil, Amina	N/D	sin efecto hasta 48°C	N/D	NO USAR
Butil, Eter	N/D	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Butil, Ftalato	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	menor hasta 48°C	NO USAR
Butileno	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Butírico, Acido	menor hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	N/D	NO USAR
Café	sin efecto	N/D	sin efecto	NO USAR
Cal	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Calcio, Bisulfato	N/D	N/D	sin efecto	NO USAR
Calcio, Bisulfuro	menor	sin efecto	moderado	NO USAR
Calcio, Bisulfito	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Calcio, Carbonato	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Calcio, Clorato	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Calcio, Cloruro	moderado hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Calcio, Hidróxido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Calcio, Hipoclorito	moderado hasta 22°C	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Calcio, Nitrato	moderado hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Calcio, Oxido	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Calcio, Sulfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Calgon	sin efecto	N/D	sin efecto	NO USAR
Caña, Jugo	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Carbólico, Acido (Fenol)	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Carbón, Bisulfuro	menor	N/D	severo	NO USAR
Carbón, Dióxido	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Carbón, Dióxido (seco)	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Carbón, Dióxido (mojado)	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Carbón, Disulfuro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Carbón, Monóxido	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Carbón, Tetracloruro	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Carbón, Tetracloruro (seco)	menor	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Carbón, Tetracloruro (mojado)	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Carbonatada, agua	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Carbónico, Acido	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Catsup	sin efecto	N/D	sin efecto	NO USAR
Cerveza	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Cervecería, levaduras	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Ciánico, Acido	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Ciclohexano	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Ciclohexanona	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Cítrico, Aceites	sin efecto	N/D	menor	NO USAR
Cítrico, Acido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Clórico, Acido	severo	sin efecto	N/D	NO USAR
Clorinada, cola	N/D	N/D	menor	NO USAR
Clorinada, agua	moderado	sin efecto	moderado	NO USAR

Cloro, Anhídrico	moderado hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Cloro, seco	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Cloroacético, Acido	menor hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Clorobenceno (mono)	sin efecto hasta 22°C	menor	severo	NO USAR
Clorobromometano	N/D	sin efecto	menor	NO USAR
Cloroformo	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Clorosulfónico, Acido	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Clorox (blanqueo)	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Cobre, Cianuro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Cobre, Cloruro	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Cobre, Fluoborato	severo	N/D	N/D	NO USAR
Cobre, Nitrato	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Cobre, Sulfato 5%	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Cobre, Sulfato >5%	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Cola, P.V.A.	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Crema	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Cresoles	sin efecto hasta 48°C	N/D	severo	NO USAR
Cresílico, Acido	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Crómico, Acido 5%	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Crómico, Acido 10%	menor	sin efecto	moderado	NO USAR
Crómico, Acido 30%	menor hasta 48°C	sin efecto	menor	NO USAR
Crómico, Acido 50%	moderado	sin efecto	menor	NO USAR
Cromo, Sales	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Cúprico, Acido	severo	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Curtidos (licores de)	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	menor	NO USAR
Detergentes	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Diacetona, Alcohol	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Diclorobenceno	N/D	sin efecto	severo	NO USAR
Dicloroetano	menor	sin efecto hasta 22°C	N/D	NO USAR
Diesel, Carburante	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Dietil, Eter	menor hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR



Dietilamina	sin efecto	severo	menor	NO USAR
Dietileno, Glicol	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Difenil	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Difenil, Oxido	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Dimetil, Anilina	menor hasta 48°C	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Dimetil, Formamida	sin efecto	severo	menor	NO USAR
Ensaladas, aderezos	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Epsomita, sales	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Estánnico, Cloruro	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Estánnico, Fluoborato	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Estannoso, Cloruro	moderado hasta 48°C	sin efecto	moderado	NO USAR
Estaño, Sales	N/D	sin efecto	menor	NO USAR
Esteárico, Acido	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Estireno	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Etano	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Etanol	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Etanolamina	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	menor	NO USAR
Eter	sin efecto	sin efecto	moderado	NO USAR
Etil, Acetato	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Etil, Benzoato	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Etil, Cloruro	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Etil, Eter	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Etil, Sulfato	severo	sin efecto	N/D	NO USAR
Etileno, Bromuro	sin efecto	sin efecto	moderado	NO USAR
Etileno, Clorohidrina	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Etileno, Cloruro	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Etileno, Diamina	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Etileno, Dicloruro	menor	sin efecto	moderado	NO USAR
Etileno, Glicol	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Etileno, Oxido	menor	sin efecto	moderado	NO USAR
Fenol 10%	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Fenol (Acido carbónico)	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Férrico, Cloruro	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Férrico, Nitrato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Férrico, Sulfato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Ferroso, Cloruro	severo	sin efecto	N/D	NO USAR
Ferroso, Sulfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Fluobórico, Acido	menor	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Fluor	moderado	menor	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Fluosílico, Acido	moderado	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Formaldehido 40%	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Formaldehido 100%	moderado	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Fórmico, Acido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Fosfórico, Acido (< 40%)	severo	sin efecto	menor	NO USAR
Fosfórico, Acido (> 40%)	severo	sin efecto	menor	NO USAR
Fosfórico, Acido (bruto)	severo	sin efecto	menor	NO USAR
Fosfórico, Acido (disuelto)	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Fosfórico, Acido anhídrido	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Fosforoso	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	N/D	NO USAR
Fosforoso, Tricloruro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Fotográficas, soluciones	severo	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Fotográfico, revelador	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Freón 11	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Freón 12	menor hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Freón 22	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Freón 113	N/D	sin efecto	severo	NO USAR
Freón TF	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Ftálico, Acido	menor hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Ftálico, anhídrido	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Fuel, Aceites	sin efecto	menor	severo	NO USAR
Furán, Resina	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	moderado	NO USAR

Furfural	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Gálico, ácido	sin efecto	menor	menor	NO USAR
Gasolina (aromática)	sin efecto	menor	severo	NO USAR
Gasolina, sín plomo	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Gelatina	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Glicerina	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Glicólico, ácido	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Glucosa	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Grasa	N/D	sin efecto	severo	NO USAR
Grasos, Ácidos	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Heptano	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Herbicidas	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Hexano	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Hidráulico, aceite (petroleo)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Hidráulico, aceite (sintético)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Hidrazina	sin efecto	moderado	sin efecto	NO USAR
Hidrobromico, ácido 20%	severo	N/D	sin efecto	NO USAR
Hidrobromico, acido 100%	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Hidrocianico, ácido	menor hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Hidrocianico, Gas 10%	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Hidroclórico, ácido 20%	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Hidroclórico, acido 37%	severo	sin efecto	moderado	NO USAR
Hidroclórico, acido 100%	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Hidroclórico, ácido (gas seco)	severo	sin efecto	N/D	NO USAR
Hidrofluórico, ácido 20%	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Hidrofluórico, ácido 50%	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Hidrofluórico, ácido 75%	severo	sin efecto	moderado	NO USAR
Hidrofluórico, ácido 100%	menor hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Hidrofluosílico, ácido 20%	moderado hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Hidrofluosílico, ácido 100%	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Hidrógeno, gas	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Hidrógeno, peróxido 10%	menor hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Hidrógeno, peróxido 30%	menor hasta 48°C	sin efecto	menor	NO USAR
Hidrógeno, peróxido 50%	menor hasta 48°C	sin efecto	menor	NO USAR
Hidrógeno, peróxido 100%	menor hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Hidrógeno, sulfuro (aqua)	moderado	sin efecto	menor	NO USAR
Hidrógeno, sulfuro (seco)	moderado hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Hidroquinona	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Hidroxiacético, ácido 70%	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Idoformo	sin efecto	moderado	sin efecto	NO USAR
Iodina	severo	sin efecto	menor	NO USAR
Iodina (en alcohol)	N/D	N/D	sin efecto	NO USAR
Isooctano	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Isopropil, acetato	moderado	sin efecto	menor	NO USAR
Isopropil, Eter	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	severo	NO USAR
Isotano	N/D	N/D	N/D	NO USAR
Jabón, Soluciones	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Jet (fuel JP3, JP4, JP5)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Keroseno	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Ketonas	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Laca, diluyentes	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Laca, goma (blanqueada)	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Laca, goma (naranja)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Láctico, ácido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Latex	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Leche	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Lejías:KOH Potasio, hidróxido	menor	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
NAOH Sodio, hidróxido	menor	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Lejías:CA(OH)2 Calcio, hidróxido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Licores blancos (molino de pasta)	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Ligroina	N/D	sin efecto	severo	NO USAR

Linóleico, ácido	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Litio, cloruro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Litio, hidróxido	menor	sin efecto	N/D	NO USAR
Lubricantes	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Magnesio, Bisulfato	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	N/D	NO USAR
Magnesio, Carbonato	menor	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Magnesio, Cloruro	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Magnesio, Hidróxido	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Magnesio, Nitrato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Magnesio, Oxido	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Magnesio, Sulfato (Sales de Epsom)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Maléico, Acido	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Maléico, Anhídrido	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Málico, Acido	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Malta (mojada)	sin efecto	N/D	sin efecto	NO USAR
Manganeso, Sulfato	menor	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Mantequilla (suero)	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Mayonesa	moderado	sin efecto	N/D	NO USAR
Melamina	N/D	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Melazas	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Mercurio	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Mercurio, Cianuro	moderado	menor	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Mercurio, Cloruro (diluido)	severo	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Mercurio, Nitrato	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Metano	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Metanol, Metil, alcohol)	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Metil, Acetato	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR

Metil, Acetona	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Metil, Acrilato	sin efecto	N/D	menor	NO USAR
Metil, Alcohol 10%	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Metil, Bromuro	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Metil, Butil Ketona	sin efecto	N/D	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Metil (Cellosolve)	menor	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Metil, Cloruro	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Metil, Dicloruro	N/D	N/D	severo	NO USAR
Metil Etil Ketona	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Metil Etil Ketona, Peróxido	N/D	N/D	severo	NO USAR
Metil Isobutil Ketona	menor	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Metil Isopropil Ketona	sin efecto	sin efecto	moderado hasta 22°C	NO USAR
Metil Metacrilato	menor	N/D	severo	NO USAR
Metilamina	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Metileno, Cloruro	menor	sin efecto	moderado hasta 22°C	NO USAR
Miel	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Minerales, Licores	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Monocloroacético, Acido	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	moderado	NO USAR
Monoetanolamina	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Morfolina	N/D	sin efecto hasta 48°C	severo	NO USAR
Motor, aceite	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Nafta	sin efecto	menor	severo	NO USAR
Naftalina	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Natural, Gas	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Niquel, Cloruro	severo	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR

Niquel, Nitrato	menor	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Niquel, Sulfato	menor	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Nitratador, Acido <1% ácido	moderado	sin efecto	N/D	NO USAR
Nitratador, Acido <15% SO4H2	moderado	sin efecto	N/D	NO USAR
Nitratador, Acido > 15% SO4H2	moderado	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Nitratador, Acido <15% HNO3	moderado	sin efecto	N/D	NO USAR
Nítrico, Acido 5-10%	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Nítrico, Acido 20%	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Nítrico, Acido 50%	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Nítrico, Acido concentrado	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	severo	NO USAR
Nitrobenceno	menor	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Nitrógeno, Fertilizante	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Nitrometano	sin efecto	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Nitroso, Acido	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Nitroso, Oxido	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Oléico, Acido	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Oleum 25%	menor hasta 48°C	sin efecto	severo	NO USAR
Oleum, 100%	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Oxálico, Acido (frio)	menor	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Orina	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Oxido, Inhibidores	sin efecto	N/D	N/D	NO USAR
Ozono	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Palmítico, Acido	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	menor hasta 22°C	NO USAR
Parafina	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Pentano	moderado	sin efecto	severo	NO USAR


Perclórico, Acido	moderado	sin efecto	menor	NO USAR
Percloroetileno	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Petrolatum	sin efecto	moderado	sin efecto	NO USAR
Petroleo	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	severo	NO USAR
Pícrico, Acido	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Piridina	sin efecto	sin efecto	menor	NO USAR
Pirogálico, ácido	menor hasta 48°C	sin efecto	menor	NO USAR
Plata, bromuro	severo	sin efecto	N/D	NO USAR
Plata, nitrato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Plomo, Acetato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Plomo, Nitrato	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Plomo, Sulfamato	moderado	menor	sin efecto	NO USAR
Potasio, Carbonato	menor	N/D	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, bicarbonato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Potasio, bromuro	menor	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, cianuro (soluciones)	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, Clorato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, Cloruro	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, cromato	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Potasio, dicromato	menor	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, ferricianuro	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Potasio, ferrocianuro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Potasio, hidróxido (Potasa cáustica)	menor	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Potasio, hipoclorito	moderado hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, ioduro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR



Potasio, nitrato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Potasio, oxalato	menor	sin efecto hasta 48°C	N/D	NO USAR
Potasio, permanganato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Potasio, sulfato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Potasio, sulfuro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Propano (líquido)	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Propileno	menor hasta 22°C	sin efecto hasta 48°C	severo	NO USAR
Propileno, Glicol	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Resinas	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	N/D	NO USAR
Resorcina	N/D	N/D	menor hasta 22°C	NO USAR
Ron	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Salicílico, ácido	menor hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Salmuera (ClNa saturada)	menor hasta 22°C	N/D	sin efecto	NO USAR
Sidra	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Silicona	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Sodio, acetato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, aluminato	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Sodio, benzoato	N/D	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Sodio, bicarbonato	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Sodio, bisulfato	severo	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Sodio, bisulfito	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Sodio, borato (borax)	menor hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, bromuro	moderado	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	NO USAR
Sodio, carbonato	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Sodio, clorato	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Sodio, cloruro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Sodio, cromato	menor hasta 22°C	sin efecto	N/D	NO USAR
Sodio, cianuro	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Sodio, ferrocianuro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, fluoruro	severo	sin efecto hasta 22°C	sin efecto	NO USAR
Sodio, hidrosulfito	N/D	sin efecto	menor	NO USAR
Sodio, hidróxido (20%)	menor	sin efecto	menor	NO USAR
Sodio, hidróxido (50%)	menor	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Sodio, hidróxido (80%)	moderado	sin efecto hasta 22°C	menor hasta 22°C	NO USAR
Sodio, hipoclorito (100%)	severo	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Sodio, hipoclorito (<20%)	moderado	sin efecto	menor	NO USAR
Sodio, hiposulfato	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Sodio, metafosfato	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Sodio, metasilicato	sin efecto	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	NO USAR
Sodio, nitrato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, perborato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, peróxido	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Sodio, polifosfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, silicato	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Sodio, sulfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, sulfuro	menor	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Sodio, sulfito	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, tetraborato	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sodio, tiosulfato (hipo)	sin efecto hasta 48°C	sin efecto	sin efecto hasta 48°C	NO USAR
Stoddard, disolvente	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Suero	sin efecto	sin efecto	N/D	NO USAR
Sulfato (licores)	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Sulfúrico, ácido (<10%)	severo	sin efecto	sin efecto	NO USAR

Sulfúrico, ácido (10-75%)	severo	sin efecto	menor hasta 48°C	NO USAR
Sulfúrico, ácido (75-100%)	moderado	sin efecto	menor hasta 22°C	NO USAR
Sulfúrico, ácido frio concentrado	moderado	sin efecto	moderado	NO USAR
Sulfúrico, ácido caliente concentrado	severo	sin efecto	severo	NO USAR
Sulfuroso, ácido	menor hasta 22°C	sin efecto	menor	NO USAR
Sulfúreo, cloruro	N/D	sin efecto	N/D	NO USAR
Tánico, ácido	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Tartárico, ácido	moderado hasta 48°C	sin efecto	menor	NO USAR
Tetracloroetano	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Tetracloroetileno	N/D	sin efecto	severo	NO USAR
Tetrahidrofuran	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Tolueno	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Trementina	sin efecto	sin efecto	severo	NO USAR
Tricloroacético, ácido	severo	sin efecto	menor	NO USAR
Tricloroetano	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Tricloroetileno	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Triclorofosfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Tricloropropano	sin efecto	sin efecto hasta 22°C	N/D	NO USAR
Trietilamina	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Trisodio, fosfato	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Urea	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Úrico, ácido	menor	sin efecto	N/D	NO USAR
Vinagre	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Vinil, acetato	menor	sin efecto hasta 48°C	menor hasta 48°C	NO USAR
Vinil, cloruro	menor hasta 48°C	sin efecto hasta 48°C	moderado	NO USAR
Whiskey y Vinos	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Xileno	menor	sin efecto	severo	NO USAR
Zinc, cloruro	menor	sin efecto	sin efecto	NO USAR
Zinc, hidrosulfito	sin efecto	sin efecto	sin efecto	USAR
Zinc, sulfato	menor hasta 22°C	sin efecto	sin efecto	NO USAR

	<b>SELECCIÓN SUSTANCIAS A EVAPORAR FABRICANTE</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: GSS-02</b>		<b>EMISIÓN:20/11/2018</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Páginas: 6</b>

*Anexo Q Compatibilidad de sustancias químicas proporcionadas por el fabricante<sup>73</sup>*

<b>sustancia química</b>	<b>SS 304</b>	<b>Teflón (PTFE)</b>	<b>EPDM</b>	<b>USO</b>
Líquidos de remolacha	A	A	A	USAR
Melaza	A	A	A	USAR
Agua desionizada	A	A	A	USAR
Aceite de palma	A	A	A	USAR
Agua destilada	A	A	A	USAR
Coca cola (syrup)	A	A	A	USAR
Leche	A	A	A	USAR
Azúcar (líquidos)	A	A	A	USAR
Glicerol	A	A	A	USAR
Metasilicato de sodio	A	A	A	USAR
Cerveza	A	A	A	USAR
Gelatina	A	A	A	USAR
Detergentes	A	A	A	USAR
Licor de azúcar de caña	A	A	A	USAR
Miel	A	A	A	USAR
Jugo de caña	A	A	A	USAR
Acetato de amilo	A	A	A	USAR
Etanol	A	A	A	USAR
Metanol	A	A	A	USAR
Acetona	A	A	A	USAR
Acetileno	A	A	A	USAR
Formaldehido 40%	A	A	A	USAR
Bicarbonato de sodio	A	A	A	USAR
Ácido sulfúrico 10%	A	A	A	USAR

<sup>73</sup> PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. Manual De Operación&nbsp;Tren De Evaporación Triple Efecto (Control Manual) REF. TE-M. 2018. p. 1-62

Amoniaco 10%	A	A	A	USAR
Metilamina	A	A	A	USAR
Glucosa (jarabe de maíz)	A	A	A	USAR
Carbonato de sodio	A	A	A	USAR
Ácido láctico (Solución al 5%)	A	A	A	USAR
Ácido fosfórico 10%	A	A	A	USAR
Ácido fosfórico 20%	A	A	A	USAR
Metil etil cetona	A	A	A	USAR
Alcohol isobutílico	A	A	A	USAR
Alcohol amílico	A	A	A	USAR
Ácido cítrico 5%	A	A	A	USAR
Sulfato de magnesio	A	A	A	USAR
Dietilenglicol	A	A	A	USAR
Trietilamina	A	A	A	USAR
Óxido de calcio	A	A	A	USAR
Anhídrido ftálico	A	A	A	USAR
Látex	A	A	A	USAR
Cetonas	A	A	A	USAR
Aceite de coco	A	A	D	NO USAR
Aceite de maíz	B	A	C	NO USAR
Aceite de motor	A	A	D	NO USAR
Aceite de oliva	B	A	D	NO USAR
Aceite hidráulico (petro)	A	A	D	NO USAR
Aceite hidráulico (sintético)	A	A	D	NO USAR
Aceite mineral	A	A	D	NO USAR
Aceites combustibles	A	B	D	NO USAR
Acetaldehído	N/A	A	A	NO USAR
Acetato de isoamilo	A	N/A	B	NO USAR
Acetato de isobutilo	A	N/A	C	NO USAR
Acetato de isopropilo	C	A	B	NO USAR
Acetato de etilo	B	A	B	NO USAR
Acetato de metilo	A	A	C	NO USAR
Acetato de sodio	B	A	A	NO USAR
Acetato de vinilo	B	A	B	NO USAR
Ácido acético	D	A	A	NO USAR
Ácido acético 20%	B	A	A	NO USAR
Ácido acético 80%	D	A	A	NO USAR
Ácido acético glacial	C	A	B	NO USAR

Ácido benzoico	B	A	D	NO USAR
Ácido cítrico	B	A	A	NO USAR
Ácido clórico	D	A	N/A	NO USAR
Ácido clorosulfónico	D	A	D	NO USAR
Ácido crómico 5%	B	A	A	NO USAR
Ácido crómico 50%	C	A	B	NO USAR
Ácido esteárico	B	A	B	NO USAR
Ácido fórmico	C	A	A	NO USAR
Ácido fosfórico 50%	A	A	B	NO USAR
Ácido fosfórico concentrado	A	A	B	NO USAR
Ácido ftálico	B	A	A	NO USAR
Ácido láctico	B	A	A	NO USAR
Ácido linoleico	B	A	D	NO USAR
Ácido monocloroacético	D	D	C	NO USAR
Ácido nítrico concentrado	A	A	D	NO USAR
Ácido nítrico 5-10%	A	A	B	NO USAR
Ácido nítrico 20%	A	A	B	NO USAR
Ácido nítrico 50%	B	A	D	NO USAR
Ácido oleico (red oil)	B	A	B	NO USAR
Ácido oxálico 5% (caliente y frío)	B	A	A	NO USAR
Ácido oxálico frío	D	A	A	NO USAR
Ácido palmítico	B	A	B	NO USAR
Ácido perclórico	D	A	B	NO USAR
Ácido salicílico	B	A	A	NO USAR
Ácido sulfúrico 95%	A	A	C	NO USAR
Ácido sulfúrico 75%	C	A	C	NO USAR
Ácido sulfúrico 60%	D	A	C	NO USAR
Ácido sulfúrico 50%	D	A	B	NO USAR
Ácido sulfúrico 25%	B	A	B	NO USAR
Ácido sulfúrico <10%	D	A	A	NO USAR
Ácido sulfúrico concentrado (frío)	C	A	C	NO USAR
Ácido sulfúrico concentrado (caliente)	D	A	D	NO USAR
Agua carbonatada	A	N/A	N/A	NO USAR
Agua de mar	C	A	A	NO USAR
Agua Regia (80% HCl, 20% HNO <sub>3</sub> )	D	A	C	NO USAR
Alcohol bencílico	B	A	B	NO USAR

Almidón	B	A	B	NO USAR
Aminas	A	A	C	NO USAR
Amoniaco, líquido	N/A	A	A	NO USAR
Benceno	B	A	D	NO USAR
Benzaldehído	B	A	B	NO USAR
Benzoato de sodio	N/A	A	A	NO USAR
Bicarbonato de potasio	B	A	A	NO USAR
Bisulfito de sodio	D	A	A	NO USAR
Bórax	B	A	A	NO USAR
Butano	A	A	D	NO USAR
Butanol	A	A	B	NO USAR
Buteno	A	A	D	NO USAR
2-Butoxietanol	A	B	A	NO USAR
Café	A	N/A	A	NO USAR
Carbonato de calcio	B	A	A	NO USAR
Carbonato de magnesio	B	A	C	NO USAR
Ciclohexano	B	A	D	NO USAR
Clorobenceno	A	B	D	NO USAR
Cloroformo	A	A	D	NO USAR
Colorantes	A	N/A	N/A	NO USAR
Dietilamina	A	D	B	NO USAR
Difenil éter	A	A	N/A	NO USAR
Difenilo	B	A	D	NO USAR
Dimetil éter	B	A	N/A	NO USAR
Dimetil formamida	A	A	B	NO USAR
Dióxido de azufre	D	A	B	NO USAR
Dioxano	A	D	A	NO USAR
Estireno	A	A	D	NO USAR
Etanolamina	A	A	B	NO USAR
Éter butílico	B	A	D	NO USAR
Éter de isopropilo	A	A	D	NO USAR
Éter de petróleo	A	D	A	NO USAR
Éter etílico	B	A	D	NO USAR
Éter metílico	N/A	A	A	NO USAR
Etilenglicol	B	A	A	NO USAR
Fenol	B	A	N/A	NO USAR
Formaldehido 100%	B	A	A	NO USAR
Furfural	A	A	D	NO USAR
Gasolina	A	A	D	NO USAR

Heptano	A	A	D	NO USAR
Hexano	A	A	D	NO USAR
Hidroquinona	B	A	D	NO USAR
Hidrosulfito de sodio	N/A	A	B	NO USAR
Hidróxido de calcio	B	A	A	NO USAR
Hidróxido de calcio 10% (en ebullición)	A	N/A	A	NO USAR
Hidróxido de magnesio	B	A	A	NO USAR
Hidróxido de potasio	B	A	A	NO USAR
Hidróxido de sodio <20%	C	A	B	NO USAR
Hidróxido de sodio 20%	B	A	N/A	NO USAR
Hipoclorito de sodio 100%	D	A	B	NO USAR
Isobutanol	A	A	N/A	NO USAR
Isooctano	A	A	D	NO USAR
Isopropanol	B	A	B	NO USAR
Jet Fuel (JP3, JP4, JP5)	A	A	D	NO USAR
Jugos de frutas	A	A	N/A	NO USAR
Lacas	A	A	D	NO USAR
Lubricantes	A	A	D	NO USAR
Metil butil cetona	A	N/A	B	NO USAR
Metil isobutil cetona	B	A	C	NO USAR
Metil isopropil cetona	A	A	C	NO USAR
Monoetanolamina	A	A	B	NO USAR
Nafta	A	B	D	NO USAR
Naftalina	A	A	D	NO USAR
Nitrato de calcio	C	A	B	NO USAR
Nitrato de sodio	B	A	A	NO USAR
Nitrobenceno	B	A	D	NO USAR
Óxido de magnesio	A	A	N/A	NO USAR
Pentano	C	A	D	NO USAR
Permanganato de potasio	B	A	A	NO USAR
Peróxido de hidrógeno 100%	B	A	D	NO USAR
Peróxido de hidrógeno 50%	B	A	B	NO USAR
Peróxido de hidrógeno 30%	B	A	B	NO USAR
Peróxido de hidrógeno 10%	B	A	A	NO USAR




Peróxido de sodio	B	A	A	NO USAR
Piridina	B	A	B	NO USAR
Propilenglicol	B	A	A	NO USAR
Propileno	B	A	D	NO USAR
Queroseno	A	A	D	NO USAR
Sulfato de calcio	B	A	A	NO USAR
Sulfato de potasio	B	A	A	NO USAR
Sulfato de sodio	B	A	A	NO USAR
Sulfato de zinc	B	A	A	NO USAR
Tintas	C	A	A	NO USAR
Tiosulfato de sodio	B	A	A	NO USAR
Tolueno (toluol)	A	A	D	NO USAR
Urea	B	A	A	NO USAR
Vinagre	B	A	A	NO USAR
Xileno	B	A	D	NO USAR
Yodo	D	A	B	NO USAR

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

## ANEXO R

### GUÍA EXPERIMENTAL 1 EVAPORACIÓN EFECTO SIMPLE

	<b>GUÍA EXPERIMENTAL 1 EVAPORACIÓN EFECTO SIMPLE</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO: GE-01</b>		<b>EMISIÓN: 28/01/2019</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Páginas: 10</b>

### EVAPORACIÓN EFECTO SIMPLE

#### Objetivo general

Conocer el funcionamiento y aplicaciones del tren de evaporación adquirido por la fundación Universidad de América, así como asumir un rol específico dentro del escenario de una planta de producción real.

#### Objetivos específicos.

- Determinar el coeficiente global de transferencia de calor
- Evaluar la economía y la capacidad del proceso
- Calcular las pérdidas de calor en el proceso
- Concentrar la solución azucarada hasta 50° brix
- Evaluar costos del proceso y la operación

#### Fundamentos teóricos

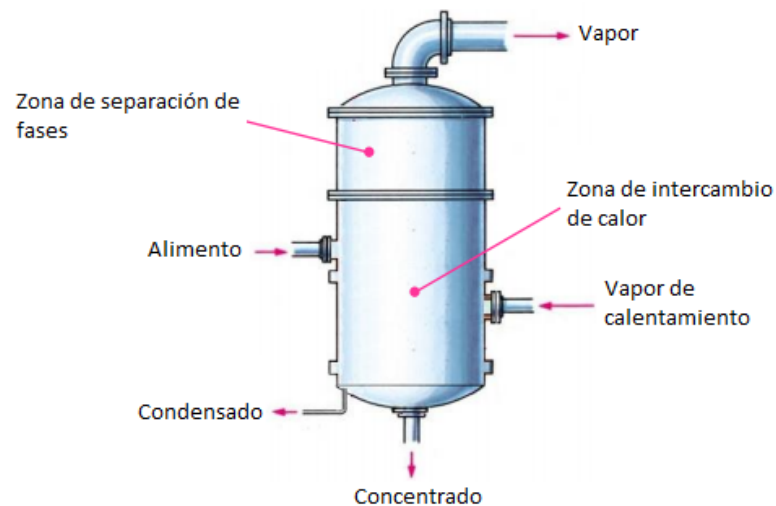
La evaporación es una operación unitaria que consiste en añadir calor a una solución compuesta por un soluto no volátil y un disolvente volátil que generalmente es agua con el fin de remover parcial o totalmente el contenido de la misma presente en la solución por medio de la ebullición, logrando así un aumento en la cantidad de sólidos presentes en la solución<sup>74</sup>.

<sup>74</sup> BARBOSA CÁNOVAS, G. y VEGA MERCADO, H. Deshidratación De Alimentos. Zaragoza, España: Acibia Editorial, 2000. p. 2979788420009186

Los equipos que se emplean para este proceso se denominan evaporadores, estos están compuestos de dos partes; la zona de intercambio de calor y la de separación de fases. Dependiendo de la configuración de la zona de calentamiento existen diferentes tipos de evaporadores: de calandria vertical u horizontal, de chaqueta, de película (ascendente o descendente), de película agitada, de recirculación por intercambiador externo, de platos, entre otros, los cuales son explicados en el capítulo 1 del presente trabajo de grado. La operación se puede llevar a cabo en continuo, utilizando una sola etapa o arreglos de múltiples equipos.

A continuación, se presenta un esquema general de un evaporador.

*figura 59 Esquema de un evaporador*



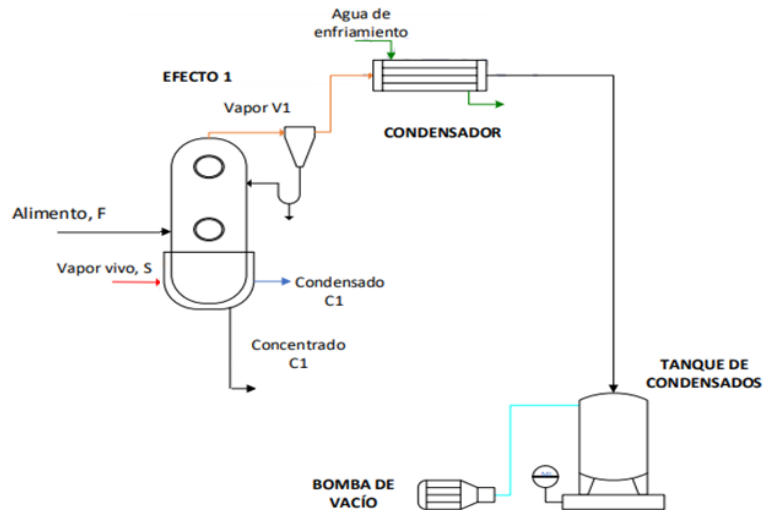
Fuente:(PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. 2018)

### **Procedimiento experimental evaporación simple.**

Para el desarrollo de la práctica se realizó el siguiente procedimiento, el cual debe ser ejecutado por un total de 6 “técnicos operarios” que previamente han sido escogidos en el grupo conformado por mínimo 8 y máximo 11 personas, cada uno debe localizarse en la sección asignada y responder por cada una de las válvulas y equipos a manipular en el siguiente procedimiento. Estos deben ser supervisados de cerca por el “jefe de planta” impartiendo órdenes y aclarando dudas al momento de la operación. A continuación, se presenta el procedimiento a seguir de manera rigurosa. Pasadas 4 horas de práctica de laboratorio el siguiente grupo entrará a hacer el relevo de las funciones.

Nota: El flujo de vapor vivo es fijo y este no se debe tocar en ningún momento.

Figura 60. Evaporador de simple efecto



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. ()*. Bogotá.

1. Desde la interfaz HMI seleccionar la operación de evaporación simple efecto en el evaporador de chaqueta siguiendo la ruta: Checklist/1efecto/Chaqueta
2. Cerrar las válvulas de salida y purga del evaporador de chaqueta (V-110 y V-111).
3. Verificar que la válvula para calibración del rotámetro R-103 (V-96) se encuentra cerrada.
4. Abrir la válvula de alimentación al evaporador de chaqueta (V-109).
5. Abrir la válvula (V-57) en el manifold del tanque de alimento que permite el paso del alimento hacia el evaporador de chaqueta.
6. Verificar que las válvulas de alimentación a los demás efectos se encuentran cerradas (V-58, V-59, V-60).
7. Asegurarse que haya suministro de agua al tanque de alimento (TK-101) o que la solución de trabajo se encuentre por encima del nivel mínimo del tanque.
8. Registrar el peso del tanque de alimentación (TK-101).
9. Abrir la válvula (V-50) a la salida de la bomba de alimentación (P-101).
10. Abrir la válvula (V-53) de bypass del rotámetro de la bomba de alimento.
11. Desde la interfaz HMI encender la bomba de alimentación (P-101) hasta que el líquido alcance la parte superior del nivel tipo caldera (LG-06) del evaporador de chaqueta.
12. Abrir la válvula para permitir el paso de vapor desde el evaporador de Chaqueta al condensador (V-30).

13. Cerrar las válvulas de purga de los tanques de vapor vivo condensado (TK-104), de producto (TK-106) y de condensados (TK-107): V-130, V-146, V-147 y V-39.
14. Abrir las válvulas (V-52, V-54) a la entrada y salida del rotámetro de la bomba de alimento (P-101).
15. Cerrar la válvula (V-53) de bypass de la bomba de alimento.
16. Abrir la válvula (V-111) de salida de producto del evaporador chaqueta
17. Cerrar las válvulas (V-113, V-116, V-120, V-121 y V-110) de calibración, toma de muestras de la bomba (P-104), calibración rotámetros y desagüe a la salida del evaporador de calandria chaqueta.
18. Verificar que las válvulas que dan paso al producto desde evaporador de chaqueta hacia el evaporador de calandria horizontal, vertical y condensador (V-123 V-124 V-128) se encuentren cerradas.
19. Abrir las válvulas (V-117, V-119, V-122 y V-127) para permitir el paso del producto concentrado hasta el tanque de producto (TK-106).
20. Abrir la válvula de salida (V-37) del visor de condensación.
21. Cerrar las válvulas (V-03, V-04 y V-06) que permiten el paso de vapor vivo hacia otros evaporadores diferentes al que se va a operar.

### **Operación a presión atmosférica**

22. Abrir las válvulas (V-131, V-145, V-38, V-35) de alivio atmosférico de los tanques de vapor vivo condensado (TK-104), de producto (TK-106), de condensados (TK-107) y del visor de condensación.
23. Abrir las válvulas que permiten la entrada y salida de agua de refrigeración hacia el condensador (V-31 y V-32).
24. Desde la interfaz HMI activar el comando para iniciar la lectura y almacenamiento de datos en el tiempo.
25. Tomar datos de presión en los manómetros: PI-08, PI-09 y PI-12 en los mismos intervalos de tiempo que sean tomados los datos de temperatura y masa.
26. Abrir la válvula (V-05) para permitir el paso de vapor vivo hacia el evaporador de chaqueta y regular su presión usando la válvula (V-11).
27. Desde la pantalla HMI encender la bomba (P-104) a la salida del evaporador de chaqueta y ajustar un flujo de salida.
28. Rectificar el flujo en la bomba (P-104) haciendo uso del rotámetro (R-104).
29. Desde la pantalla HMI encender la bomba de alimento (P-101) y ajustar su flujo con el rotámetro (R-101).
30. Verificar el inicio de la operación a partir de la caída de condensado en el visor.

## **Operación al vacío**

23.1 Abrir las válvulas (V-131, V-145) de alivio atmosférico de los tanques de vapor vivo condensado (TK-104) y de producto (TK-106).

24.1 Cerrar las válvulas (V-35, V-38) de alivio atmosférico del tanque de vapor condensado (TK-107) y del visor de condensación.

25.1 Abrir las válvulas que permiten la entrada y salida de agua de refrigeración hacia el condensador (V-31 y V-32).

26.1 Llenar la trampa de vacío con hielo para evitar el arrastre de gases condensables en la bomba de vacío (P-105).

27.1 Abrir la válvula (V-43) para conectar el sistema a la bomba de vacío.

28.1 Desde la pantalla HMI encender la bomba de vacío (P-105).

29.1 Regular el vacío usando la válvula de aguja (V-40).

30.1 Desde la interfaz HMI activar el comando para iniciar la lectura y almacenamiento de datos en el tiempo.

31.1 Tomar datos de presión en los manómetros: PI-08, PI-09 y PI-12 en los mismos intervalos de tiempo que sean tomados los datos de temperatura y masa.

32.1 Abrir la válvula (V-05) para permitir el paso de vapor vivo hacia el evaporador de chaqueta y regular su presión usando la válvula (V-11).

33.1 Desde la pantalla HMI encender la bomba (P-104) y ajustar un flujo de salida.

34.1 Rectificar el flujo en la bomba (P-104) haciendo uso del rotámetro (R-104).

35.1 Desde la pantalla HMI encender la bomba de alimento (P-101) y ajustar su flujo con el rotámetro (R-101).

36.1 Verificar el inicio de la operación a partir de la caída de condensado en el visor.

## **Parada del proceso.**

### **Operación a presión atmosférica.**

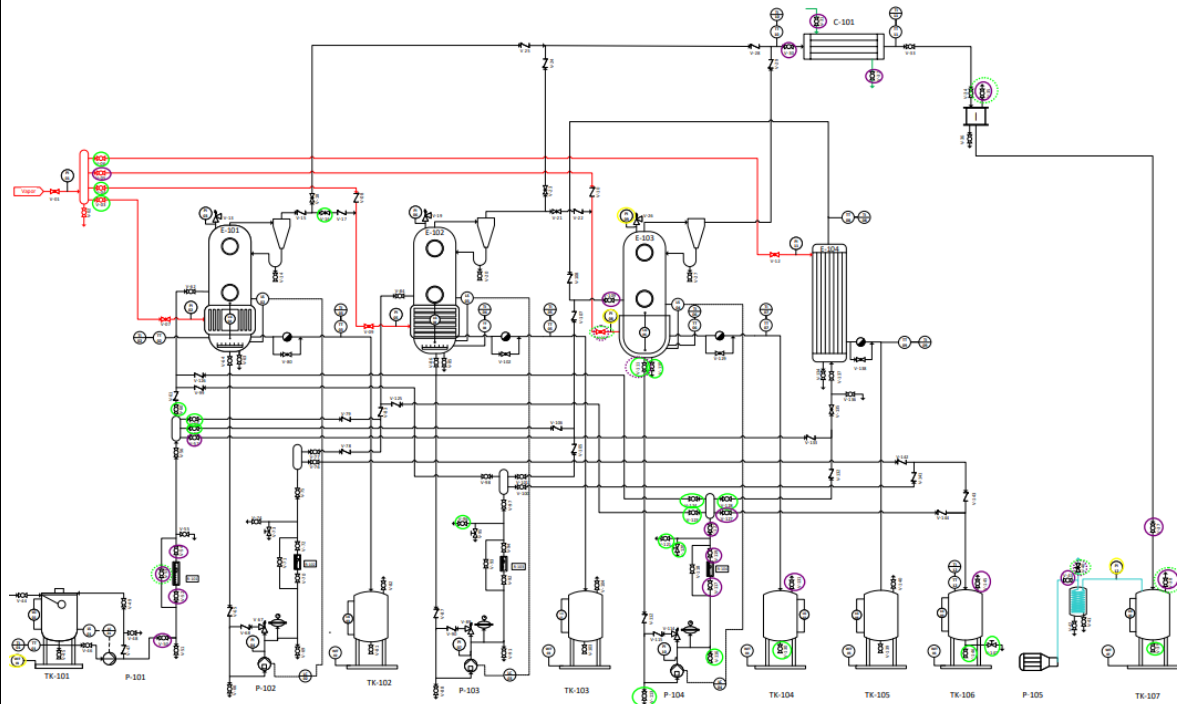
1. Cerrar las válvulas de suministro de vapor vivo al evaporador de chaqueta (V-05, V-11).
2. Desde la pantalla HMI apagar la bomba de alimento (P-101),
3. Desde la pantalla HMI apagar la bomba (P-104) a la salida del evaporador de chaqueta.
4. Cerrar la válvula (V-44) de entrada al tanque de alimento.
5. Cerrar la válvula (V-111) a la salida del evaporador de calandria vertical.
6. Cuando no se observe caída de condensado en el visor cerrar la válvula (V-31) de entrada de agua de refrigeración.
7. Registrar el peso final de los tanques de alimentación (TK-101), de vapor vivo condensado (TK-104), de condensados (TK-107) y de producto (TK-106).
8. Permitir que el sistema se enfríe y desocupar los tanques
9. Desocupar el evaporador de chaqueta a partir de la apertura de la válvula de purga (V-110).

### **Operación al vacío**

1. Abrir las válvulas (V-38, V-35) de alivio atmosférico del tanque de condensados (TK-107) y del visor de condensación.
2. Desde la pantalla HMI apagar la bomba de vacío (P-105).
3. Cerrar las válvulas de suministro de vapor vivo al evaporador de chaqueta (V-05, V-11).
4. Desde la pantalla HMI apagar la bomba de alimento (P-101).
5. Desde la pantalla HMI apagar la bomba (P-104) a la salida del evaporador de chaqueta.
6. Cerrar la válvula (V-44) de entrada al tanque de alimento.
7. Cerrar la válvula (V-111) a la salida del evaporador de chaqueta.
8. Cuando no se observe caída de condensado en el visor cerrar la válvula (V-31) de entrada de agua de refrigeración.
10. Registrar el peso final de los tanques de alimentación (TK-101), de vapor vivo condensado (TK-104), de condensados (TK-107) y de producto (TK-106).
9. Permitir que el sistema se enfríe y desocupar los tanques
10. Desocupar el evaporador de chaqueta a partir de la apertura de la válvula de purga (V-110).

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de proceso en el cual se resaltan con color morado las válvulas que deben ser abiertas, con verde las válvulas que deben cerrarse y por último con amarillo lo que se debe revisar y tomar nota durante el proceso.

Figura 61. Operación evaporador simple efecto



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

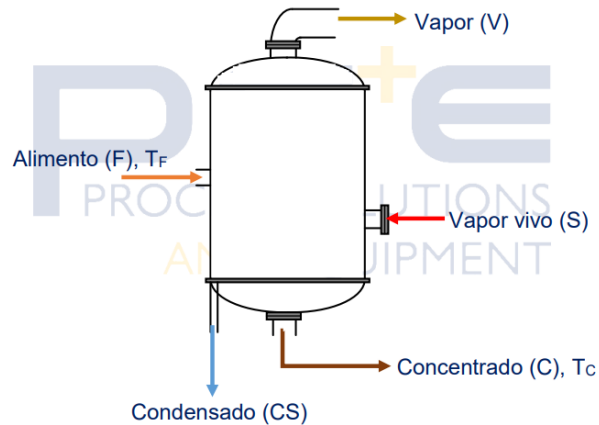
Debido a la robustez del equipo se asignará un estudiante con el rol de técnico operario por sección del equipo, para ello en el anexo M se muestran las diferentes secciones. El operario estará encargado de realizar la recolección de los datos presentes en su sección, así como de manipular las válvulas presentes en el mismo.

Cada uno debe realizar su propia bitácora de recolección de datos y el jefe de planta debe garantizar que la totalidad de los datos se llenen.



## Recolección y tratamiento de datos

Figura 62. volumen de control sobre un evaporador.



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. ()*. Bogotá

En la siguiente tabla se enuncian las variables que deben ser recolectadas durante la práctica de laboratorio:

Tabla 24. Variables a recolectar durante la operación

Notación	Ubicación
Masa	
MI-04	Masa de vapor condensado en el evaporador de chaqueta
Presión	
PI-05	Presión del vapor alimentado al evaporador de chaqueta
PI-06	Presión en el evaporador de chaqueta
Temperatura	
TI-06	Temperatura en el evaporador de chaqueta
TI-07	Temperatura del vapor vivo condensado en el evaporador de chaqueta

## Tareas post práctica

### Evaluación de la economía, capacidad y coeficiente de transferencia de calor.

De acuerdo a lo expuesto en la sección 1.5.4 referente al coeficiente global de transferencia de calor y suponiendo que no hay sub- enfriamiento del condensado, la forma de calcular U es:

*Ecuación 40 Coeficiente global de transferencia de calor.*

$$\dot{Q} = \dot{m}_s \lambda_s = UA\Delta T$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p.

Donde  $\lambda_s$  es el calor latente de vaporización del agua,  $\dot{m}_s$  el flujo másico de vapor vivo, A el área de transferencia de calor,  $\Delta T$  la diferencia de temperatura y  $\dot{Q}$  el calor suministrado al sistema. Despejando la ecuación tenemos:

$$U = \frac{\dot{m}_s \lambda_s}{A\Delta T}$$

FUENTE: GEANKOPLIS, C. J. procesos de transporte y operaciones unitarias. 3rd ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. 547-573 p.

El flujo másico de vapor vivo corresponde a la masa recolectada en el tanque de condensado durante toda la práctica, dividido entre el tiempo de duración de la misma. Por otro lado, el área de transferencia de calor es igual para los tres evaporadores (0.3 m<sup>2</sup>). La diferencia de temperaturas entre el vapor vivo y la solución ( $T_v - T_s$ ) se puede asumir como la fuerza motriz del proceso, y estas se pueden obtener de los sensores correspondientes.

Se presenta el procedimiento para calcular la economía del proceso y la capacidad. Por último, se debe calcular el cálculo de las pérdidas de calor por medio de un balance energía sobre el evaporador de la siguiente manera:

$$H_F + H_S = H_V + H_C + H_{CS} + Q_P$$

Donde  $H_F$  es la entalpía total del alimento,  $H_S$  es la entalpía total del vapor vivo,  $H_V$  es la entalpía total del vapor generado,  $H_C$  es la entalpía del concentrado,  $H_{CS}$  es la entalpía total del condensado y  $Q_P$  es el calor perdido.

Tabla 25. Fórmulas que deben ser usadas para calcular calor perdido

Corriente	Ecuación	Observaciones
Alimento	$H_F = \dot{m}_F h_F$	$h_F$ Entalpía del agua como líquido saturado a la temperatura del alimento.
Vapor vivo	$H_S = \dot{m}_S h_S$	$h_S$ Entalpía del vapor saturado seco a la presión de alimentación del mismo
Solvente evaporado	$H_V = \dot{m}_V h_V$	$h_V$ Entalpía de vapor saturado seco a la presión del evaporador
Concentrado	$H_C = \dot{m}_C h_C$	$h_C$ Entalpía de líquido saturado a $T_C$ (temperatura de la línea de concentrado).
Condensado vapor vivo	$H_{CS} = \dot{m}_{CS} h_{CS}$	$h_{CS}$ Entalpía de líquido subenfriado a la temperatura a T de la zona de intercambio en el evaporador.

FUENTE: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. (). Bogotá

### **Evaluación económica en la operación del evaporador de simple efecto.**


El grupo de trabajo a la cabeza de gerente de la planta debe elaborar los siguientes documentos con el fin de entregarlos a la nueva licitación que ofrece el estado colombiano, la cual se encuentra liderada por el Ministro de Industria y Comercio (profesor encargado).

Se debe elaborar un presupuesto en el que se incluyan los costos de la operación; en esta se deben tener en cuenta el gasto energético tanto de producción de vapor vivo como de servicios públicos a nivel industrial, entre los que se destaca el consumo de energía de los elementos presentes en el tren de evaporación, teniendo en cuenta la proporción que se debe guardar al ser un evaporador de simple efecto, lo que traduce en un aumento en los costos operativos al requerir mayor tiempo de uso para concentrar la solución y por ende mayor cantidad de vapor vivo.

Adicionalmente, la mano de obra tanto calificada como no calificada; en esta se debe tener en cuenta las obligaciones legales que deben ser pagadas por parte de la empresa, entre las que se incluyen EPS, ARL y todas las prestaciones de ley.

## ANEXO S

### GUIA EXPERIMENTAL 2 EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO CON ALIMENTACIÓN EN PARALELO

	<b>GUIA EXPERIMENTAL EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO CON ALIMENTACIÓN EN PARALELO</b>		<b>VERSIÓN 01</b>
	<b>CÓDIGO:GE-01</b>		<b>EMISIÓN:28/01/2019</b>
	<b>Elaborado: Luis Eduardo Ayala Padilla</b>	<b>Revisado: Felipe Correa Mahecha</b>	<b>Páginas: 18</b>

#### EVAPORACIÓN DE TRIPLE EFECTO CON ALIMENTACIÓN EN PARALELO

##### Objetivo general

Realizar una aproximación real a la evaporación como operación unitaria, empleando un tren de evaporación a escala piloto aplicado un proceso de concentración usado en la industria azucarera.

##### Objetivos específicos.

- Determinar el coeficiente global de transferencia de calor
- Evaluar la economía y la capacidad del proceso
- Calcular las pérdidas de calor en el proceso
- Concentrar la solución azucarada hasta 50° brix
- Evaluar costos del proceso y la operación
- Conocer el efecto de aumentar el número de efectos

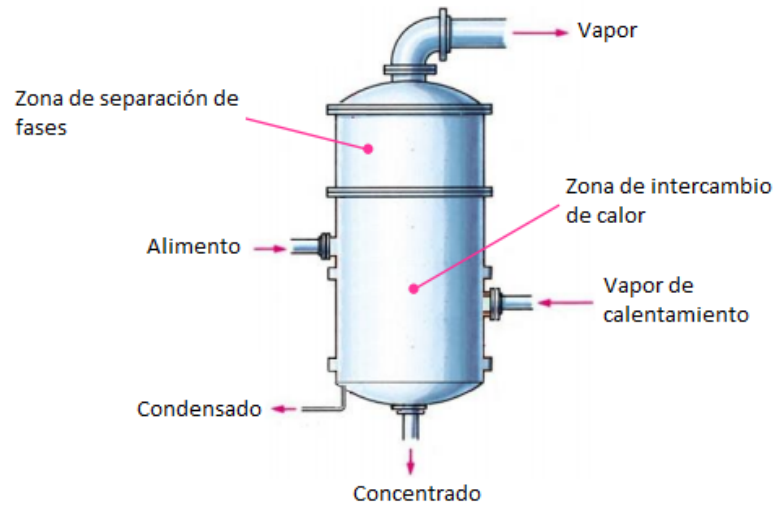
##### Fundamentos teóricos

Al aumentar el número de efectos del tren de evaporadores se logra reducir el consumo energético del proceso realizando una inversión mucho mayor gracias al aumento el área de transferencia de calor.<sup>75</sup>

<sup>75</sup> GEANKOPLIS, C. J. Procesos De Transporte Y Operaciones Unitarias. 3 ed. MÉXICO: CONTINENTAL, S.A. DE C.V. MÉXICO, 1998. p. 547-573

La decisión de utilizar uno o varios efectos en un tren de evaporación radica en el uso que se le dé, ya que si es poco el uso que se va a brindar, el costo de la adquisición de un nuevo efecto no será compensado a largo plazo con el ahorro en el consumo de vapor vivo.

*Figura 63. Esquema de un evaporador*



Fuente:(PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT  
PS&E S.A.S. 2018)

Al aumentar el número de efectos del tren de evaporadores se logra reducir el consumo energético del proceso realizando una inversión mucho mayor gracias al aumento del área de transferencia de calor. La decisión de utilizar uno o varios efectos en un tren de evaporación radica en el uso que se le dé, ya que si es poco el uso que se va a brindar, el costo de la adquisición de un nuevo efecto no será compensado a largo plazo con el ahorro en el consumo de vapor vivo.

### **Materiales**

- 40 litros de solución al 10% en peso de Azúcar comercial.
- Bitácora de laboratorio
- Refractómetro
- 3 recipientes de plástico para recolección de muestras de 1 litro.
- 3 Beaker de 250 ml
- 3 pipetas pasteur.

### **Preparación solución**

Para la elaboración de la solución a concentrar se necesitan los siguientes materiales:

- 37.403 litros de agua
- 4.155 kg de azúcar comercial.

Se debe realizar la mezcla de las sustancias hasta que el total del azúcar se solubilice en el agua. Esta se debe preparar con un día de anticipación a la práctica ya que la solubilización puede tardar entre 5 y 6 horas.

### **Juego de roles**

El juego de roles es una estrategia didáctica de aprendizaje en la que cada estudiante realiza la inmersión en un papel específico dentro de un contexto dado, con el fin de recrear un ambiente real, este caso una planta de concentración de azúcar. Esta estrategia de aprendizaje provee al estudiante de herramientas que enriquecen el aprendizaje y enseña a cumplir con un papel específico con lo que el mismo acarree.

Este juego permite que se acceda al conocimiento de forma ágil con base en la utilidad práctica vista en lo que está aprendiendo, haciendo que el estudiante tienda a elaborar esquemas y mapas mentales con el fin de cumplir con las responsabilidades asignadas. "El juego de roles fortalece la diversidad, el apoyo mutuo y las relaciones en términos de igualdad, ya que este juego no es de carácter competitivo porque necesita de la colaboración de los demás integrantes del grupo para alcanzar las metas que individualmente sería imposibles de cumplir"<sup>76</sup>

El juego de roles tiene tres momentos específicos, el antes, el durante y el después en donde cada uno de los participantes desempeñaran funciones específicas dentro de la organización. Dentro del contexto de una planta química se diseñaron 3 papeles, cada uno con tareas específicas las cuales son mencionadas a continuación:

#### **Gerente.**

Es la cabeza del grupo, encargado de la toma de decisiones económicas que impulsan el crecimiento de la empresa. Es el representante legal de la empresa ante el estado y la sociedad, responsable de los actos que realice todo el personal y de realizar la venta del producto.

---

<sup>76</sup> ARIAS VARGAS, Nohora Marlen. Uso De Un Juego De Rol Como Herramienta De Motivación En La Enseñanza De La Química; Universidad Nacional de Colombia, 2012. p. 11-15

**Jefe de planta.**

Es el jefe inmediato del personal que labora en la planta de producción de azúcar, encargado de ser el garante de cumplir con todas las normas establecidas en el área de trabajo, así como velar por la integridad de los trabajadores a su cargo.

El ingeniero a cargo de dicha labor debe rendir cuentas al gerente de la empresa y debe informar sobre cualquier anomalía presentada al momento de la operación.

**Técnicos operarios.**

Estos son los encargados de realizar la operación del equipo guiados por el jefe de la planta, son la pieza más importante dentro de la organización. Al ser personal con estudios técnicos se encuentra en la capacidad de realizar el muestreo de la solución a concentrar con el fin de informar al jefe de planta sobre el avance del proceso.

**Tareas previas asignadas al equipo de trabajo**

El equipo de trabajo debe ser de mínimo 8 personas de las cuales 6 serán técnicos operarios encargados de la ejecución de las tareas lideradas por el jefe de planta cuyas tareas son descritas a continuación, esta tarea puede ser bastante robusta así que se recomienda tener dos estudiantes a cargo, de igual forma sucede con el gerente.

Debido al tiempo que puede tardar en ejecutarse la práctica se asignaran dos turnos de entrada al laboratorio, es decir cada práctica cubrirá un total de 16 estudiantes; los primeros realizarán la puesta en marcha del equipo y los últimos ejecutarán la parada del proceso, es así como se distribuyen cargas lo que permite crear una unión entre equipos ya que la operación depende de ambos grupos.

En primera instancia el equipo de trabajo debe realizar la selección de los papeles que se han creado, para esto se deben evaluar las actitudes que los integrantes poseen y mediante una votación se debe escoger al más apto para cada papel.

Una vez adjudicados los papeles se debe informar al profesor e inmediatamente se da inicio al juego de roles en el que el profesor hará las veces de auditor de su empresa.

Las tareas previas al ingreso a la planta de producción se encuentran distribuidas por función a continuación.

Las tareas del gerente son:

- Realizar cotización real de los materiales que deben ser usados en la planta de producción en por los menos 5 proveedores, en los que se debe incluir la factura de cada uno de los lugares.
- Realizar un presupuesto del costo en servicios industriales (Agua de servicio, cantidad de combustible, luz industrial) estimado de la producción. Para esto se debe apoyar del jefe de planta, el cual entregara los cálculos pertinentes.
- Consultar con el proveedor (Laboratorista o en su defecto en la guía de operación proporcionada por el fabricante) las especificaciones técnicas del vapor vivo.
- Crear una bitácora de desempeño para cada trabajador, tenga en cuenta su cargo.

Las tareas del jefe de planta son:

- En primera instancia debe proporcionar las herramientas suficientes para realizar la estimación de costos que debe ser realizada por el gerente, para esto debe realizar una primera aproximación al tren de evaporación, realizando una simulación del proceso en Aspen plus, con el fin de calcular los requerimientos energéticos y de servicios industriales.
- Solicitar los planos del tren de evaporación en el cual se deben identificar cada uno de los componentes que se manipularan durante la práctica de laboratorio.

Las tareas de los operarios son:

- Realizar la bitácora de toma de muestras en el equipo, esta debe contener un rótulo en el cual se debe mencionar el nombre de la persona que realizó la medición y quien verificó la misma. Recuerde que será el único documento donde se podrá realizar el registro de las variables del sistema y se debe registrar por triplicado, la primera para el auditor, la segunda para el jefe de planta y la última para el registro propio. Este documento debe contener como mínimo las variables descritas en las tablas 25, 26 y 27

#### **Tareas realizadas durante la operación de la planta.**

Las tareas del gerente son:

- Realizar la evaluación del personal adjudicando una nota entre 0 y 5, explicando en una bitácora dicha calificación.



- Realizar entrevista con el auditor de la empresa en la que se exponga como opera la planta de concentración, para esto se debe apoyar en la información técnica proporcionada por el jefe de planta. El gerente debe dominar las normas de seguridad y demarcación del área de trabajo para que estas sean cumplidas a cabalidad por todo el personal que labora en la planta.
- El gerente debe redactar una propuesta para los clientes en la que otorgue un valor al producto terminado luego de realizar la discusión con su jefe de planta, esta debe ser entregada al auditor.

Las tareas del jefe de planta son:

- Supervisar que todo el personal cumpla con las normas de seguridad en el área de trabajo, para ello debe tomar nota de cada una de las faltas que los trabajadores comentan como el uso inadecuado de los implementos de protección personal, la incorrecta manipulación del equipo.
- Realizar supervisión y control de las tareas asignadas al personal de planta haciendo chequeo cruzado de los datos suministrados por los demás empleados.
- Servir como guía a los técnicos que desarrollaran el proceso en caso de que se presenten dudas a la hora de manipular el equipo.
- Proporcionar las dosis exactas para realizar la solución a concentrar.

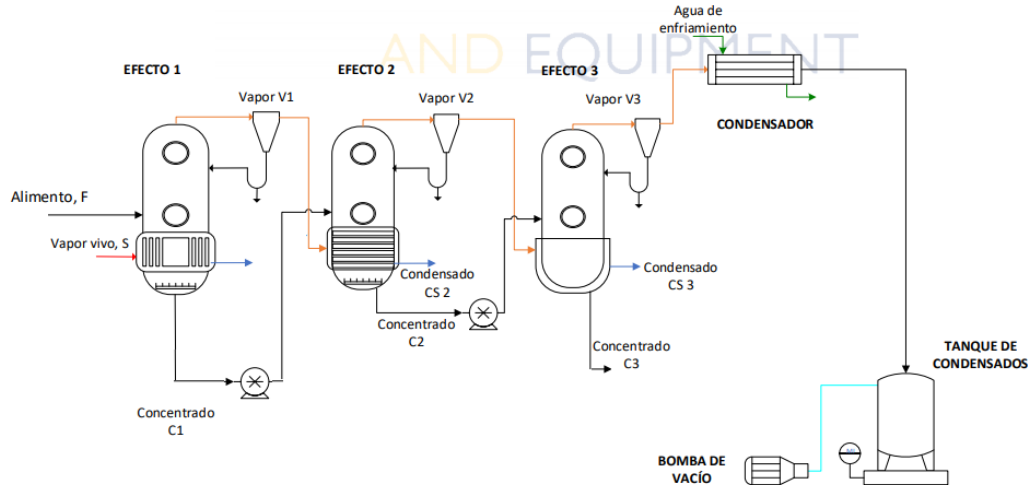
Las tareas asignadas a los técnicos operarios son:

- Manipulación del tren de evaporación según sea la sección asignada de acuerdo al anexo M
- Seguimiento a las variables de temperatura, presión y masa mostradas en el procedimiento experimental evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo
- Preparación de la solución a evaporar.
- Realizar inspección en el refractómetro de la cantidad de sólidos secos presentes en la solución.
- Mantener en orden y aseo el área de trabajo
- Cumplir a cabalidad con las normas del área de trabajo.

**Procedimiento experimental evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo**

La evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo será la práctica de laboratorio a desarrollar, en la figura 60 se presenta un esquema de operación del tren de evaporación.

Figura 64. Evaporación de triple efecto con alimentación en paralelo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. ()*. Bogotá.

Para el desarrollo de la práctica se realizó el siguiente procedimiento, el cual debe ser ejecutado por un total de 6 “técnicos operarios” que previamente han sido escogidos en el grupo conformado por mínimo 8 y máximo 11 personas, cada uno debe localizarse en la sección asignada y responder por cada una de las válvulas y equipos a manipular en el siguiente procedimiento. Estos deben ser supervisados de cerca por el “jefe de planta” impartiendo órdenes y aclarando dudas al momento de la operación. A continuación, se presenta el procedimiento a seguir de manera rigurosa. Pasadas 4 horas de práctica de laboratorio el siguiente grupo entrará a hacer el relevo de las funciones.

- Desde la interfaz HMI seleccionar la operación de evaporación de triple efecto en paralelo siguiendo la ruta: Checklist/3efectos/Paralelo.
- Cerrar las válvulas (V-63, V-64) de salida y purga del evaporador de calandria vertical.
- Cerrar las válvulas (V-85, V-86) de salida y purga del evaporador de calandria horizontal.
- Cerrar las válvulas (V-110, V-111) de salida y purga del evaporador de chaqueta.
- Abrir las válvulas (V-62, V-84, V-109) de entrada a los evaporadores de calandria vertical, calandria horizontal y de chaqueta.

- Asegurarse que haya suministro de agua al tanque de alimento (TK-101) o que la solución de trabajo se encuentre por encima del nivel mínimo del tanque.
- Registrar el peso del tanque de alimentación (TK-101).
- Abrir la válvula (V-50) a la salida de bomba (P-101).
- Abrir la válvula (V-53) de bypass del rotámetro de la bomba de alimento.
- Abrir la válvula (V-58) en el manifold del tanque de alimento que permite el paso del alimento hacia el evaporador de chaqueta.
- Desde la interfaz HMI encender la bomba de alimentación (P-101) hasta que el líquido alcance la parte superior del nivel tipo caldera (LG-06) del evaporador de chaqueta.
- Cerrar la válvula (V-58) en el manifold del tanque de alimento.
- Abrir la válvula (V-59) en el manifold del tanque alimento que permite el paso del alimento hacia el evaporador de calandria horizontal.  
Desde la interfaz HMI encender la bomba de alimentación (P-101) hasta que el líquido alcance la parte superior del nivel tipo caldera (LG-04) del evaporador de calandria horizontal.
- Cerrar la válvula (V-59) en el manifold del tanque de alimento.
- Abrir la válvula (V-60) en el manifold del tanque de alimento que permite el paso del alimento hacia el evaporador de calandria vertical.
- Desde la interfaz HMI encender la bomba de alimentación (P-101) hasta que el líquido alcance la parte superior del nivel tipo caldera (LG-02) del evaporador de calandria vertical.
- Abrir las válvulas (V-16, V-09) para permitir el paso de vapor desde el evaporador de calandria vertical al evaporador de calandria horizontal.
- Cerrar la válvula (V-18) que permite el paso de vapor del evaporador de calandria vertical al condensador.
- Abrir las válvulas (V-21, V-11) para permitir el paso de vapor desde el evaporador de calandria horizontal al evaporador de chaqueta.
- Cerrar la válvula (V-23) que permite el paso de vapor del evaporador de calandria horizontal al condensador.
- Abrir la válvula (V-30) para permitir el paso de vapor al condensador.
- Cerrar las válvulas (V-81, V-103, V-130, V-146, V-147 y V-39) de purga de los tanques de vapor vivo condensado (TK-102, TK-103, TK-104), de producto (TK106) y de condensados (TK-107).
- Abrir las válvulas (V-52, V-54) a la entrada y salida del rotámetro de la bomba de alimento.
- Cerrar la válvula (V-53) de bypass de la bomba de alimento.
- Abrir las válvulas (V-64, V-86, V-111) de salida de los evaporadores de calandria vertical, calandria horizontal y chaqueta.
- Cerrar las válvulas (V-66, V-69, V-71, V-73, V-74) de bypass, calibración, desagüe y toma de muestras de la bomba (P-102) a la salida del evaporador de calandria vertical.

- Abrir las válvulas (V-70, V-72, V-75, V-77) para permitir el paso del producto concentrado del evaporador de calandria vertical al evaporador de calandria horizontal.
- Cerrar las válvulas (V-88, V-91, V-93, V-95, V-96) de bypass, calibración, desagüe y toma de muestras de la bomba (P-103) a la salida del evaporador de calandria horizontal.
- Abrir las válvulas (V-92, V-94, V-97, V-101) para permitir el paso del producto concentrado del evaporador de calandria horizontal al evaporador de chaqueta.
- Cerrar las válvulas (V-113, V-116, V-118, V-120, V-121) de bypass, calibración, desagüe y toma de muestras de la bomba (P-104) a la salida del evaporador de chaqueta.
- Abrir las válvulas (V-117, V-119, V-122, V-127) para permitir el paso del producto concentrado del evaporador de chaqueta al tanque de producto (TK106).
- Abrir la válvula de salida (V-37) del visor de condensación.
- Cerrar las válvulas (V-04, V-05 y V-06) que permiten el paso de vapor vivo hacia otros evaporadores diferentes al que se va a operar.
- Asegurarse que haya suministro de agua al tanque de alimento (TK-101) o que la solución de trabajo se encuentre por encima del nivel mínimo del tanque.
- Abrir las válvulas (V-82, V-104, V-131, V-145) de alivio atmosférico de los tanques de vapor vivo condensado (TK-102, TK-103, TK-104) y de producto (TK-106).
- Cerrar las válvulas (V-38, V-35) de alivio atmosférico del tanque de vapor condensado (TK-107) y del visor de condensación.
- Abrir las válvulas que permiten la entrada y salida de agua de refrigeración hacia el condensador (V-31 y V-32).
- Llenar la trampa de vacío con hielo para evitar el arrastre de gases condensables en la bomba de vacío (P-105).
- Abrir la válvula (V-43) para conectar el sistema a la bomba de vacío.
- Desde la pantalla HMI encender la bomba de vacío.
- Regular el vacío usando la válvula de aguja (V-40).
- Desde la interfaz HMI activar el comando para iniciar la lectura y almacenamiento de datos en el tiempo para la temperatura y el peso.
- Tomar los datos de presión en los mismos intervalos de tiempo que son tomados los datos de temperatura y peso, para los siguientes sensores: PI-02, PI-03, PI-05, PI-06, PI-08, PI-09, PI-12.
- Abrir la válvula (V-03) para permitir el paso de vapor vivo hacia el evaporador de calandria vertical y regular su presión usando la válvula (V-07).

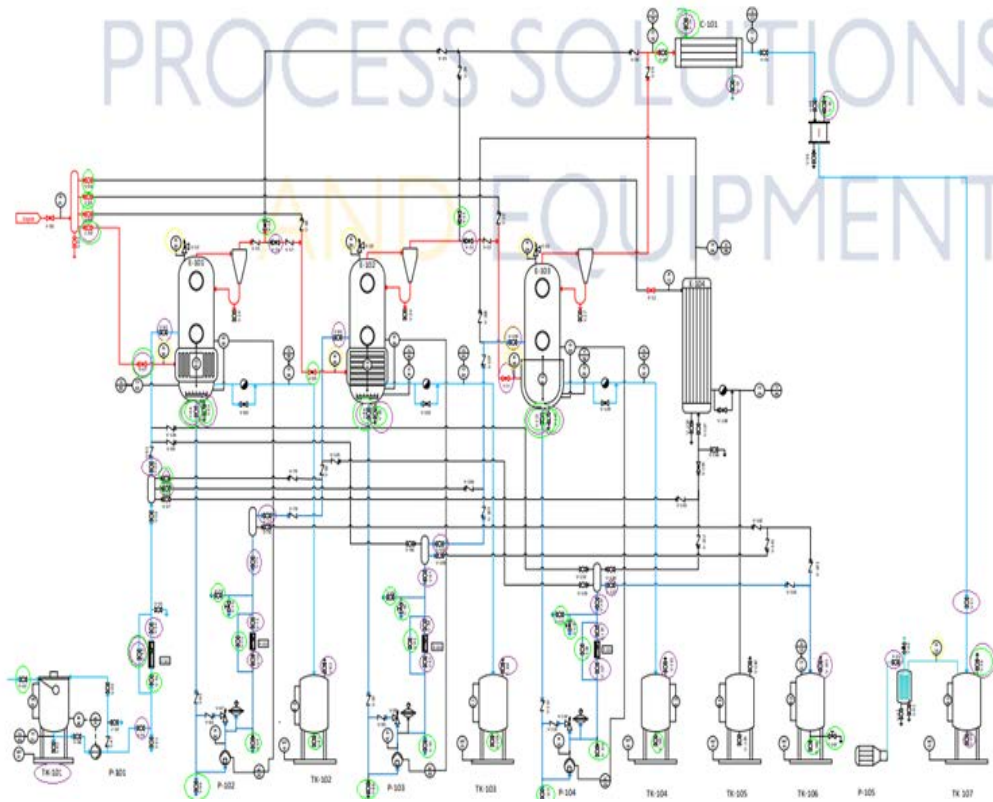
- Desde la pantalla HMI encender las bombas (P-102, P-103, P-104) y ajustar su flujo de salida.
- Rectificar el flujo en las bombas (P-102, P103, P-104) haciendo uso de los rotámetros (R-102, R-103, R-104).
- Desde la pantalla HMI encender la bomba de alimento (P-101) y ajustar su flujo con el rotámetro (R-101).
- Verificar el inicio de la operación a partir de la caída de condensado en el visor.

#### **Parada del proceso.**

- Abrir las válvulas (V-38, V-35) de alivio atmosférico del tanque de condensados (TK-107) y del visor de condensación.
- Desde la pantalla HMI apagar la bomba de vacío (P-105).
- Cerrar las válvulas de suministro de vapor vivo al evaporador de calandria vertical (V-03, V-07).
- Desde la pantalla HMI apagar la bomba de alimento (P-101).
- Desde la pantalla HMI apagar las bombas (P-102, P-103, P-104) a la salida de los evaporadores de calandria vertical, calandria horizontal, chaqueta.
- Cerrar la válvula (V-44) de entrada al tanque de alimento.
- Cerrar las válvulas (V-64, V-86, V-111) de salida de los evaporadores de calandria vertical, calandria horizontal y chaqueta.
- Cuando no se observe caída de condensado en el visor cerrar la válvula (V-31) de entrada de agua de refrigeración.
- Registrar el peso final de los tanques de alimentación (TK-101), de vapor vivo condensado (TK-102, TK-103, TK-104), de condensados (TK-107) y de producto (TK-106).
- Permitir que el sistema se enfríe y desocupar los tanques y líneas de proceso mediante las válvulas de desagüe.
- Desocupar los evaporadores de calandria vertical, calandria horizontal y chaqueta a partir de la apertura de las válvulas de purga (V-63, V-85, V-110).

A continuación, se presenta el diagrama de flujo de proceso en el cual se resaltan con color morado las válvulas que deben ser abiertas, con verde las válvulas que deben cerrarse y por último con amarillo lo que se debe revisar y tomar nota durante el proceso.

Figura 65. Evaporador de triple efecto con alimentación en paralelo



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PSE S.A.S. manual de operación; tren de evaporación triple efecto (control manual) REF. TE-M. [0]:2018. 1-62

Debido a la robustez del equipo se asignará un estudiante con el rol de técnico operario por sección del equipo, para ello en el anexo M se muestran las diferentes secciones. El operario estará encargado de realizar la recolección de los datos presentes en su sección, así como de manipular las válvulas presentes en el mismo.

Cada uno debe realizar su propia bitácora de recolección de datos y el jefe de planta debe garantizar que la totalidad de los datos se llenen.

### **Recolección y tratamiento de datos**

Durante la práctica se debe tomar nota de cada una de las variables presentes en la siguiente tabla, con el fin de obtener información para realizar los cálculos pertinentes y cumplir con los objetivos propuestos. Las variables temperatura y

masa se realiza a través del HMI, mientras que la presión se lee en cada uno de los manómetros instalados a lo largo del tren de evaporación.

Se debe revisar en intervalos de 15 minutos la concentración de la solución a evaporar, para esto se deben tomar muestras abriendo la válvula V-147, posteriormente con una pipeta Pasteur se debe llevar a un refractómetro con el fin de medir la cantidad de azúcar presente en la solución. Se debe recordar que la solución debe llegar a un contenido de 60°brix.

*Tabla 26. Datos de la variable masa que deben ser recolectados*

<b>Notación</b>	<b>Ubicación</b>
Masa	
MI-01	Masa del tanque de alimento (F)
MI-02	Masa del vapor vivo condensado en el evaporador de calandria vertical
MI-03	Masa de vapor vivo condensado en el evaporador de calandria horizontal
MI-04	Masa de vapor vivo condensado en el evaporador de chaqueta
MI-05	Masa de vapor vivo condensado en el evaporador de circulación forzada
MI-06	Masa del tanque de producto concentrado (C)
MI-07	Masa del tanque de vapor generado después de la condensación (V)

*Tabla 27. Datos de la variable presión que deben ser recolectados*

<b>Notación</b>	<b>Ubicación</b>
Presión	
PI-02	Presión del vapor alimentado al evaporador de calandria vertical
PI-03	Presión en el evaporador de calandria vertical
PI-05	Presión del vapor alimentado al evaporador de calandria horizontal
PI-06	Presión en el evaporador de calandria horizontal
PI-08	Presión del vapor alimentado al evaporador de chaqueta
PI-09	Presión en el evaporador de chaqueta

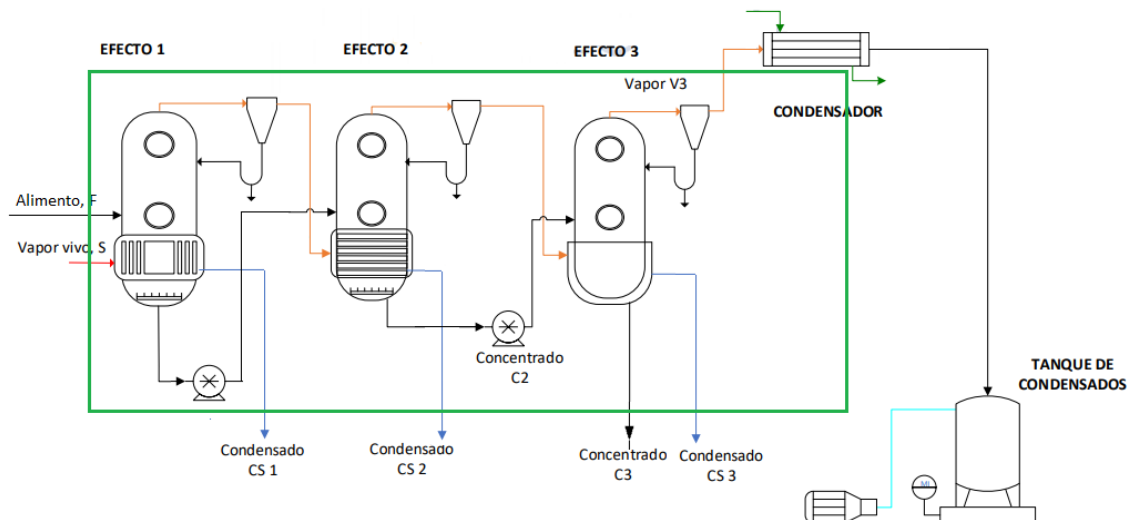
Tabla 28. Datos de la variable temperatura que deben ser recolectados

Notación	Ubicación
Temperatura	
TI-01	Temperatura en el tanque de alimento ( $T_F$ )
TI-02	Temperatura en el evaporador de calandria vertical
TI-03	Temperatura del vapor vivo condensado en el evaporador de calandria vertical
TI-04	Temperatura en el evaporador de calandria horizontal
TI-05	Temperatura del vapor vivo condensado en el evaporador de calandria horizontal
TI-06	Temperatura en el evaporador de chaqueta
TI-07	Temperatura del vapor vivo condensado en el evaporador de chaqueta
TI-12	Temperatura en el tanque de producto concentrado ( $T_C$ )

### Tareas posts práctica

Cada grupo de trabajo debe realizar los siguientes cálculos los cuales deben ser desarrollados con base en el siguiente diagrama simplificado para cada evaporador.

Figura 66. Volumen de control en evaporador de triple efecto.



Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. (). Bogotá



### Determinación del coeficiente de transferencia de calor para cada evaporador

Un balance de energía para el evaporador permite calcular el coeficiente global de transferencia. El calor suministrado al sistema corresponde al calor entregado por el vapor vivo al cambiar de fase (suponiendo que no hay sub-enfriamiento del condensado), es decir:

$$\dot{Q} = \dot{m}_s \lambda_s = UA\Delta T$$

Donde  $\lambda_s$  es el calor latente de vaporización del agua,  $U$  es el coeficiente global de transferencia de calor,  $\dot{m}_s$  es el flujo másico de vapor vivo,  $A$  es el área de transferencia de calor y  $\Delta T$  la diferencia de temperatura.

El flujo másico de vapor vivo corresponde a la masa recolectada en los tanques de condensado durante toda la práctica (TK-102, TK-103, TK-104 y TK-105) dividido entre el tiempo de duración de la misma

Por consideración la masa de vapor vivo se asume aproximadamente igual a la cantidad de condensado recolectado en cada uno de los tanques por otra parte, la masa de solvente evaporado corresponde a la masa de agua que se recolecta a la salida del condensador TK-107, el área de transferencia de calor es igual para los tres evaporadores (0.3 m<sup>2</sup>)

Para realizar estos cálculos se asume que las pérdidas de masa a lo largo del tren de evaporación incluido tubería y equipos es despreciable y que la condensación es total sin ninguna clase de pérdidas de materia.

La diferencia de temperaturas entre el vapor vivo y la solución se puede asumir como la fuerza motriz del proceso, y estas se pueden obtener de los sensores correspondientes. A partir de las ecuaciones presentes en la tabla 28 se pueden calcular el coeficiente global de transferencia de calor. El valor obtenido del coeficiente de transferencia de calor se puede comparar entre las diferentes geometrías de trabajo, con flujo natural o forzado, y a diferentes presiones de operación

*Tabla 29. Coeficiente global de transferencia de calor*

Efecto 1	Efecto 2	Efecto 3
$U_1 = \frac{\dot{m}_s \lambda_s}{A(T_s - T_{V1})}$	$U_2 = \frac{\dot{m}_{V1} \lambda_{V1}}{A(T_{V1} - T_{V2})}$	$U_3 = \frac{\dot{m}_s \lambda_s}{A(T_{V2} - T_{V3})}$

### **Evaluación de la economía del proceso, capacidad del evaporador y pérdidas de calor.**

Esta tarea es responsabilidad del jefe de planta en colaboración con los técnicos operarios ya que ellos fueron los responsables de la operación.

El rendimiento del proceso de la evaporación es medido por medio de la economía del proceso, la cual es definida como la cantidad de solvente evaporado por unidad de masa de vapor vivo utilizado.

#### *Ecuación 41 Economía del proceso*

$$\text{Economía} = \frac{m_v}{m_s} = \frac{\text{masa de solvente evaporado}}{\text{masa de vapor vivo}}$$

La capacidad del evaporador se define como la cantidad de solvente evaporado por unidad de tiempo.

El calor perdido se calcula a partir del balance de energía de la siguiente manera:

#### *Ecuación 42. Calor perdido en el proceso*

$$H_F + H_S = H_{V3} + H_{C3} + H_{CS1} + H_{CS2} + H_{CS3} + Q_P$$

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT  
PS&E S.A.S. (2018). *GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. ()*. Bogotá

Donde  $H_F$  corresponde a la entalpía total del alimento,  $H_S$  es la entalpía total del vapor vivo,  $H_V$  corresponde a la entalpía total del agua evaporada,  $H_C$  es la entalpía total del concentrado en cada uno de los evaporadores,  $H_{CS}$  corresponde a la entalpía de condensado en cada uno de los evaporadores y  $Q_P$  es el calor perdido.

Para determinar el calor perdido se deben calcular cada una de las entalpías descritas, las cuales en la tabla 29 se muestra la forma de calcularlo.

Tabla 30. Fórmulas para calcular calor perdido

Corriente	Ecuación	Observaciones
Alimento	$H_F = \dot{m}_F h_F$	$h_F$ Entalpía del agua como líquido saturado a la temperatura del alimento.
Vapor vivo	$H_S = \dot{m}_S h_S$	$h_S$ Entalpía del vapor saturado seco a la presión de alimentación del mismo
Solvente evaporado	$H_V = \dot{m}_V h_V$	$h_{V3}$ Entalpía de vapor saturado seco a la presión del tercer efecto
Concentrado	$H_C = \dot{m}_C h_C$	$h_{C3}$ Entalpía de líquido saturado a (temperatura de la línea de concentrado).
Condensado vapor vivo	$H_{CS} = \dot{m}_{CS} h_{CS}$	$h_{CS1}$ Entalpía de líquido subenfriado a la temperatura $T_{C1}$ del primer efecto. $h_{CS2}$ Entalpía de líquido subenfriado a la temperatura del segundo efecto. $h_{CS3}$ Entalpía de líquido subenfriado a la temperatura del tercer efecto

Fuente: PROCESS SOLUTIONS AND EQUIPMENT PS&E S.A.S. (2018). GUIAS DE LABORATORIO tren de evaporación triple efecto REF. TE. (). Bogotá

### Evaluación económica en la operación del tren de evaporación

El grupo de trabajo a la cabeza de gerente de la planta debe elaborar los siguientes documentos con el fin de entregarlos a la nueva licitación que ofrece el estado colombiano, la cual se encuentra liderada por el Ministro de Industria y Comercio (profesor encargado).

Se debe elaborar un presupuesto en el que se incluyan los costos de la operación; en esta se deben tener en cuenta el gasto energético tanto de producción de vapor vivo como de servicios públicos a nivel industrial, entre los que se destaca el consumo de energía de los elementos presentes en el tren de evaporación.

Adicionalmente, la mano de obra tanto calificada como no calificada; en esta se debe tener en cuenta las obligaciones legales que deben ser pagadas por parte de la empresa, entre las que se incluyen EPS, ARL y todas las prestaciones de ley.

Por otra parte, se deben incluir tres posibles compradores del concentrado, así como también realizar un sondeo a las demás empresas que hay en el sector, con el fin de generar un precio competitivo de su producto. Recuerde que las licitaciones las ganan las empresas que calculan de manera eficiente el costo del proceso generando un margen de ganancia con el cual la empresa invertirá y pagará a su vez las obligaciones legales.