

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA A ESCALA DE BANCO CON OPERACIÓN SEMICONTINUA PARA EMULSIONAR CON MEMBRANAS

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Rendón D. Vanessa J.
Para optar al Título
de Ingeniera Química

Caracas, 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA A ESCALA DE BANCO CON OPERACIÓN SEMICONTINUA PARA EMULSIONAR CON MEMBRANAS

TUTORA ACADÉMICA: Profa. Anubis Pérez
TUTOR ACADÉMICO: Prof. Leonardo Oropeza

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por la Bra. Rendón D. Vanessa J.
Para optar al Título
de Ingeniera Química

Caracas, 2010

Caracas, Noviembre de 2010

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachillera Vanessa J. Rendón D., titulado:

“Diseño y Construcción de una Planta a Escala de Banco con Operación Semicontinua para Emulsionar con Membranas”

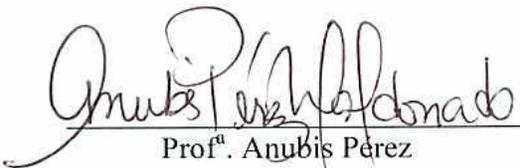
Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniera Química, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por la autora, lo declaran **APROBADO**.



Prof. Andrés Rosales
Jurado



Prof. José Sorrentino
Jurado



Prof. Anubis Pérez
Tutora Académica

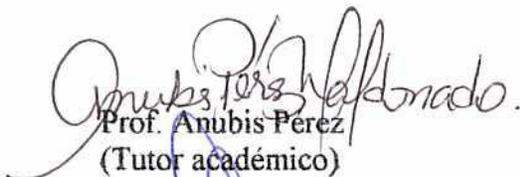


Prof. Leonardo Oropeza
Tutor Académico

MENCIÓN HONORÍFICA

Nosotros, los abajo firmantes, miembros del Jurado Examinador del Trabajo Especial de Grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA A ESCALA DE BANCO CON OPERACIÓN SEMICONTINUA PARA EMULSIONAR CON MEMBRANAS”** presentado por la bachiller Vanessa Rendón, C.I. 18.066.939, para optar al título de Ingeniero Químico otorgado por la Universidad Central de Venezuela, decidimos otorgarle la **Mención Honorífica** a dicho trabajo tomando en cuenta los siguientes méritos:

1. El trabajo representa una valiosa contribución a la línea de investigación: “Emulsiones con Membranas”, ya que la construcción de la planta “Emulmemb” permite contar con un equipo en el cual se pueden controlar las principales variables que influyen sobre el diámetro de gota de las emulsiones resultantes.
2. La bachiller Vanessa Rendón demostró ser pro-activa al enfrentar y resolver eficientemente los problemas técnicos y logísticos que surgieron durante el proceso de diseño y construcción de la planta, superando en gran medida las expectativas planteadas al inicio del trabajo.
3. Durante la ejecución de este trabajo aprendió a utilizar y aplicó una herramienta de diseño para generar los planos en 3-D, que permitieron construir la planta. Es de resaltar que esta herramienta es una de las tecnologías más recientes que se aplican a nivel laboral.
4. La bachiller Vanessa Rendón demostró poseer sólidas bases teóricas en todos los aspectos relacionados con el diseño de la planta “Emulmemb” y tener la capacidad de construirla, a partir de los documentos de ingeniería generados.
5. La planta “Emulmemb” es la única a nivel mundial que posee cuatro ciclos de operación integrados, a saber: ciclo de emulsión simple, ciclo de emulsión concentrada, ciclo de emulsión doble y ciclo de limpieza.


Prof. Anubis Pérez
(Tutor académico)


Prof. Leonardo Oropeza
(Tutor académico)

Prof. José Ángel Sorrentino
(Jurado)


Prof. Andrés Rosales
(Jurado)

*Dedico este trabajo:
¡A mi papi! Por supuesto.
Porque lo estaba esperando y lo hace muy feliz.*

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por convertirme en Ingeniera, sin nada a cambio, por darme sus días soleados, cielos azules, y arcoiris en las gramas que me inspiraban y alegraban mis días.

A Dios, por protegerme y darme fuerzas.

A mi tutora, Profa. Anubis Pérez, por darme la oportunidad de ser su tesista y demostrarme que con esfuerzo y mucha constancia se pueden lograr grandes cosas aunque no se crean posibles. Por darme su ejemplo de responsabilidad, voluntad y perseverancia, por motivarme y por apoyarme siempre, en momentos en los que más lo necesité, por ser más que una tutora, mi compañera de tesis. Gracias Profe.

A mi tutor, Prof. Leonardo Oropeza, por brindarme su apoyo y fijarse en todos los detalles.

Al Sr. Armando por apoyarnos y estar siempre dispuesto a resolver cualquier inconveniente técnico, por tener todo listo en tiempo récord, que Dios le recompense en salud el esfuerzo brindado.

Al Prof. Luis García y a la Profa. Adriana García, nuestros asesores Swagelok => ¡por su ayuda y asistencia técnica! Y por sus súper ideas, para hacer de EmulMemb, la mejor.

Al Prof. Napoleón Malpica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, por brindarnos su asistencia técnica, estar dispuesto a ayudarnos y por ser siempre amable.

A la Prof. María Rodríguez, por apoyarnos siempre.

Quiero agradecer a mi papá, por estar siempre pendiente de mi, por cuidarme y apoyarme, por hacerme fuerte y creer que siempre lo podría hacer mejor y lograr lo que quisiera, por darme ejemplo de responsabilidad, lucha y voluntad, que nada nublara mis metas, sé que está orgulloso de mí y yo siempre lo estaré, por haberlo tenido como padre.

A mi mamá, por cuidarme y educarme, por guiarme y ayudarme, por estar pendiente de que todo saliera bien, de que yo estuviera bien para terminar este trabajo con éxito.

A mis hermanas, Brigi, Mary y Nao, por ser buenas hermanas, compartir conmigo y hacerme reír, por acompañarme, prepararme un cafecito cuando tenía mucho sueño, apoyarme siempre y darme ánimo para seguir pegada a la compu, por ser fuertes!. Las quiero mucho.

A mi sobrinito Dylan de 3 mesecitos de edad, por darme alegría cuando estaba triste, por hacerme sonreír con sus... travesuras fisiológicas y sonidos cuchis. Jejeje.

A Nelson, por apoyarnos y hacer todo menos difícil.

A Tammy, por hacer más amena mi estadía en la escuela, por darme ánimo. A Dianita, por acompañarme a tomar cafecitos, por escucharme, escucharme y escucharme siempre, y darme consejos súper valiosos, por apoyarme siempre, sin ti, mi cabeza seguro fuese estallado. Las quiero...

Al casi ene, por hacerme sonreír muchas veces, por mostrarme el lado lindo de la uni. Te quiero mucho.

¡Al Prof. Manzano! Si, si, por creer en mí desde siempre, apoyarme en todo momento y darme buenos consejos, y excelentes brownies =), por orientarme y hacer que la tesis fuese ¡genial!. Por estar ahí para mí. Al Prof. Hermann, por apoyarme siempre y guiarme. Ambos me hicieron mejor prepa, y mejor persona.

A Edward, por creer en mí, y hacerme reír con tantas chispas... por apoyarme en días tristes y hacerlos alegres... Te quiero mucho.

A mis madrinas Sara y Nohelia, por aparecer como hadas. Las quiero.

A Gustavo, por ayudarme a seguir y apoyarme en momentos difíciles. A tu mami y a tu papi por ser segundos padres para mí. Los quiero mucho.

A Andreína! Por apoyarnos en el lab.!!

A Marinés, por ser buena amiga. A Carmo, por ser buen amigo. A, Yenita por guiarme, y se me olvidaban! Dani, Pablo, Gabriel, Vicente, Barby, Rosa y Alexis, por hacer que mi inicio en la uni, fuese muy agradable.

A todos.....

¡MUCHAS GRACIAS!

Rendón D. Vanessa J.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLANTA A ESCALA DE BANCO CON OPERACIÓN SEMICONTINUA PARA EMULSIONAR CON MEMBRANAS

Tutora Académica: Profa. Anubis Pérez. Tutor Académico: Prof. Leonardo Oropeza. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2010, N° pág. 141

Palabras Claves: Proceso semicontinuo, escala de banco, emulsiones, membranas, manual de procedimientos.

Resumen. Se diseñó y construyó una planta a escala de banco, con operación semicontinua, para emulsionar empleando membranas. Se evaluó la operación de un equipo por cargas empleado en el Módulo V de la EIQ-UCV, para identificar los problemas operacionales que presentaba y plantear posibles estrategias de solución, las cuales se consideraron en el diseño posterior. Los problemas identificados fueron: falta de control del esfuerzo de corte de la fase continua en la superficie de la membrana, largos tiempos de operación (5-9 h) debido al desaprovechamiento del 82% del área efectiva de la membrana, baja capacidad de procesamiento e intervalo reducido de la diferencia de presión transmembrana (Δp_{tm} máx 1,4 bar). Las soluciones planteadas fueron: diseñar un sistema con configuración de flujo cruzado donde fuese posible controlar la velocidad de la fase continua, cambiar el soporte de la membrana, diseñar tanques de almacenamiento de los fluidos y colocar sistemas de regulación manual de la presión tanto en la línea de fase dispersa como en la de fase continua. Inicialmente se tenía previsto producir emulsiones simples, sin embargo, se identificaron dos áreas de desarrollo: la producción de emulsiones concentradas y de emulsiones dobles. Se aplicaron las fases de diseño de proyectos ajustadas al presente estudio y se analizó la posibilidad de emplear varios equipos disponibles: tres bombas de desplazamiento positivo, un módulo para albergar membranas y un equipo que originalmente se empleaba para estudiar la filtración. El diseño permite procesar un máximo de 8 L. Se incrementó en un 72% el área efectiva de la membrana y un mayor intervalo para Δp_{tm} máx (10 bar). Se generaron los documentos necesarios para construir la planta, se realizó una prueba de fugas y se elaboró el manual de operaciones que incluye cuatro ciclos: producción de emulsiones simples, concentradas, dobles y por último el ciclo de limpieza de la planta. No se ha reportado en la bibliografía un diseño de un equipo similar que posea cuatro ciclos integrados como los mencionados.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Planteamiento del problema.....	3
1.2. Objetivos	6
1.2.1. Objetivo general	6
1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Antecedentes.....	7
CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL	
2.1. Emulsiones.....	12
2.2. Tipos de emulsiones.....	13
2.3. Propiedades de las emulsiones.....	14
2.4. Surfactantes y tipos.....	15
2.5. Emulsionar con membranas.....	16
2.6. Elementos involucrados en el diseño de una planta a escala de banco para emulsionar con membranas.....	23
2.6.1. Planta a escala de banco.....	23
2.6.2. Modo de operación.....	24
2.6.3. Proceso de diseño.....	24
2.6.4. Fases de la ingeniería de proyectos.....	26
2.6.4.1. Visualización.....	27
2.6.4.2. Ingeniería conceptual.....	28
2.6.4.3. Ingeniería básica.....	28
2.6.4.4. Ingeniería de detalle.....	29
2.6.4.5. Procura y puesta en marcha o arranque.....	30

2.6.5. Consideraciones de diseño de equipos.....	30
2.6.5.1. Cálculo de la energía.....	30
2.6.5.2. Criterios de diseño de equipos.....	35
CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	
3.1. Evaluación del equipo con operación por cargas.....	45
3.2. Diseño del proceso semicontinuo.....	46
3.2.1. Equipos disponibles para la construcción de la planta a escala de banco con operación semicontinua.....	46
3.2.2. Ejecución de las etapas de diseño.....	47
3.2.3. Construcción de la planta y ejecución de la prueba de fugas.....	48
3.2.4. Elaboración del manual de funcionamiento del equipo.....	48
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1. Evaluación del equipo por cargas.....	50
4.1.1. Inspección e identificación de problemas en la operación del equipo por cargas.....	50
4.1.2. Estrategias para el mejoramiento del proceso.....	52
4.2. Diseño del proceso semicontinuo.....	53
4.2.1. Visualización.....	53
4.2.2. Bases de estudio.....	54
4.2.2.1. Selección del sitio y parámetros de ubicación de la planta.....	54
4.2.2.2. Servicios y suministros requeridos.....	55
4.2.2.3. Características y condiciones de la materia prima.....	55
4.2.2.4. Requerimientos de almacén.....	56
4.2.2.5. Manejo y disposición de efluentes.....	56
4.2.2.6. Normas y códigos aplicables	57
4.2.2.7. Seguridad y protección.....	57
4.2.2.8. Capacidad de la planta.....	58
4.2.3. Descripción del proceso.....	59

4.2.4. Filosofía de control.....	62
4.2.5. Diagramas generados	63
4.2.6. Estimado de costos definitivo.....	67
4.2.7. Criterios de diseño de equipos, dimensionamiento de tuberías y válvulas de regulación, selección de válvulas de paso rápido	68
4.2.7.1. Dimensionamiento de tuberías.....	68
4.2.7.2. Verificación del uso de bombas disponibles.....	70
4.2.7.3. Dimensionamiento de válvulas de regulación y selección de válvulas de paso rápido.....	78
4.2.7.4. Validación del uso del módulo de membranas.....	79
4.2.7.5. Criterios de diseño de tanques de almacenamiento y producto final.....	82
4.2.8. Hojas de especificación.....	82
4.2.9. Lista de líneas.	90
4.2.10. Lista de válvulas, accesorios e instrumentos.....	92
4.2.11. Planos de la planta	94
4.2.12. Procura y construcción.....	97
4.2.13. Prueba de fugas.....	99
4.2.14. Manual de operación.....	100
4.3. Análisis comparativo entre la planta a escala de banco (EmulMemb) y el equipo por cargas.	107
4.4. Análisis comparativo entre EmulMemb y los sistemas descritos en el Capítulo I.	108
CONCLUSIONES.....	116
RECOMENDACIONES.....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119
APÉNDICES.....	123
APÉNDICE I: Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial.....	123
APÉNDICE II: Descripción del equipo por cargas.....	124

APÉNDICE III: Características de surfactantes a utilizar.....	126
APÉNDICE IV: Simbología de diagramas (DTI y DFP).....	128
APÉNDICE V: Cotizaciones.....	131
APÉNDICE VI: Procedimiento para curva de calibración de la bomba P-101....	132
APÉNDICE VII: Coeficiente de resistencia K, longitud equivalente L/D y coeficiente de flujo.....	133
APÉNDICE VIII: Cuadro de resistencia química de P-101.....	134
APÉNDICE IX: Cálculos realizados.....	135
APÉNDICE X: Formulaciones y variables operacionales de equipos con operación semicontinua.....	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1	Diagrama esquemático del aparato para emulsionar con membranas.....	7
Figura N°2	Vista esquemática del sistema para emulsionar con membranas.....	9
Figura N°3	Diagrama esquemático del aparato de emulsionar con membranas.....	10
Figura N°4	Tipos de emulsiones.....	13
Figura N°5	Clasificación de surfactantes (elaboración propia).....	15
Figura N°6	Principales parámetros que influyen en el proceso de emulsionar con membranas.....	17
Figura N°7	Representación del crecimiento y salida de la gota del poro de la membrana.....	18
Figura N°8	Tipos de membranas.....	20
Figura N°9	Tipos de módulo de membranas.....	21
Figura N°10	Clasificación de las plantas de acuerdo a su capacidad.....	23
Figura N°11	Esquema iterativo del proceso de diseño.....	25
Figura N°12	Limitaciones en los procesos de diseño.....	26
Figura N°13	Fases de la ingeniería de proyectos.....	27
Figura N°14	Vuelta de 90°.....	33
Figura N°15	Resistencia debido a las vueltas de 90°.....	33
Figura N°16	Sistema de flujo de fluidos que ilustra la ecuación general de la energía.....	34
Figura N°17	Manómetro de Bourdon.....	38
Figura N°18	Velocidades de flujo en bombas reciprocantes de acción directa de doble acción.....	40
Figura N°19	Curvas de flujo para bombas de potencia reciprocantes.....	40

Figura N°20	Bomba de diafragma con acoplamiento hidráulico.....	41
Figura N°21	Curva de calibración de bomba dosificadora de diafragma.....	42
Figura N°22	Etapas de desarrollo de la propuesta.....	45
Figura N°23	(a) Soporte (b) Pandeo de la membrana.....	51
Figura N°24	Agitador Magnético Corning PC 353.....	51
Figura N°25	Esquema de proceso.....	60
Figura N°26	(a) Bomba Speck. (b) Bomba Madden.....	70
Figura N°27	Gráfica del comportamiento del volumen descargado por P-101 para cada ajuste de carrera en función del tiempo.....	71
Figura N°28	Curva de calibración de la bomba P-101.....	72
Figura N°29	(a) Pieza superior del módulo vista planta parte superior (b) Pieza superior del módulo vista planta parte inferior (c) Pieza inferior del módulo vista planta parte superior (d) Pieza inferior del módulo vista planta parte inferior.....	80
Figura N°30	Caída de presión en la superficie porosa metálica del módulo.....	81
Figura N°31	Hoja de especificación de TK-101.....	83
Figura N°32	Hoja de especificación de TK-102.....	84
Figura N°33	Hoja de especificación de bombas disponibles.....	85
Figura N°34	Hoja de especificación del módulo de membranas.....	86
Figura N°35	Hoja de especificación del recipiente contenedor de la fase a dispersar.....	89
Figura N°36	Acondicionamiento del sitio.....	97
Figura N°37	Instalación de las bombas JR104A-Madden®.....	98
Figura N°38	Instalación de panel y tanques.....	98

Figura N°39	EmulMemb.....	99
Figura N°40	Daño en la válvula de succión del fluido de P-102.....	100
Figura N°41	Flujo de agua en TK-101 durante la prueba de fugas.....	100
Figura N°42	Ciclo de producción de emulsión simple.....	101
Figura N°43	Ciclo de producción de emulsión simple concentrada.....	103
Figura N°44	Ciclo de producción de emulsión doble.....	104
Figura N°45	Ciclo de limpieza de partes porosas de MO-101A y MO-101B.....	106
Figura N°46	Diagrama de Moody.....	123
Figura N°47	Filtratest.....	124
Figura N°48	Elementos de la celda.....	125
Figura N49	Simbología de cada equipo de acuerdo al diagrama.....	128
Figura N°50	Simbología de válvulas e instrumentos.....	129
Figura N°51	Cotización de Swagelok.....	130
Figura N°52	Cotización de Jehsl.....	131
Figura N°53	Coefficiente de resistencia para válvulas y accesorios.....	133
Figura N°54	Cuadro de resistencia química de la bomba P-101.....	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1	Productos de la ingeniería básica.....	29
Tabla N°2	Esquema de evaluación del equipo por cargas.....	53
Tabla N° 3	Requerimientos de almacén de las sustancias de interés.....	56
Tabla N°4	Volumen de emulsiones con 25% p/p de fase dispersa.....	58
Tabla N°5	Volumen de emulsiones con 1% p/p de fase dispersa.....	59
Tabla N°6	Costos.....	67
Tabla N°7	Cálculo estimado del régimen de flujo de la bomba P-101.....	71
Tabla N°8	Datos de calibración de la bomba de diafragma teniendo como fluido de proceso el agua.....	73
Tabla N°9	Regímenes de flujo para caudal nominal de la bomba NP10/4-140 Speck ®.....	73
Tabla N°10	Regímenes de flujo en investigaciones previas.....	74
Tabla N°11	Regímenes de flujo en el área de flujo cruzado.....	74
Tabla N°12	Pérdida de energía en la descarga	76
Tabla N°13	Coeficiente de flujo de válvulas.....	78
Tabla N°14	Lista de líneas.....	90
Tabla N°15	Lista de válvulas, accesorios e instrumentos.....	93
Tabla N°16	Análisis comparativo entre plantas reportadas en los antecedentes y EmulMemb.....	110
Tabla N°17	Ingredientes de emulsiones preparadas en equipos con operación semicontinua.....	141
Tabla N°18	Variables operacionales.....	141

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Definición	Unidades
A_r	Área no circular	m^2
C_v	Coficiente de flujo de la válvula	Adim
$C_{vmáx}$	Coficiente de flujo máximo de la válvula	Adim
d_1	Diámetro menor	m
d_2	Diámetro mayor	m
D_i	Diámetro interno de tubería	m
D_o	Diámetro exterior de tubería	m
d_p	Diámetro de poro	m
e	Espesor de la membrana	m
E_1'	Energía que posee el fluido por unidad de peso en la sección del punto 1	N.m/N
E_2'	Energía que posee el fluido por unidad de peso en la sección del punto 2	N.m/N
f	Factor de fricción de Darcy	Adim
F_d	Fuerza de arrastre de la gota	N
g	Aceleración de gravedad	m/s^2
G_f	Gravedad específica del fluido	Adim
h	Altura del canal de flujo cruzado	m
h_a	Energía agregada al fluido	N.m/N
h_f	Perdida de carga en la tubería debido a la succión	N.m/N
h_g	Carga estática de succión mínima requerida	N.m/N
h_l	Pérdida de energía retirada del sistema	N.m/N
h_m	Pérdidas menores ocasionadas por coeficiente de resistencia	
h_t	Pérdida por fricción en tramos de tuberías	N.m/N
h_{vp}	Carga de presión de vapor a la T de bombeo	
h_R	Energía retirada del fluido	N.m/N

Símbolo	Definición	Unidades
h_s	Diferencia de elevación desde el nivel del fluido en el depósito a la línea de la entrada de succión de la bomba	N.m/N
h_{sp}	Carga de presión estática sobre el fluido de almacenamiento	N.m/N
h_{vp}	Carga de presión de vapor del líquido a la temperatura de bombeo	N.m/N
J_d	Flujo volumétrico superficial	$m^3m^2s^{-1}$
K	Constante de permeabilidad	m^2
k	Coefficiente de resistencia	Adim
L	Longitud de la tubería	m
L/D_i	Longitud Equivalente	Adim
l_p	Longitud del poro	m
$NPSH_A$	Carga de succión neta positiva disponible	m
$NPSH_R$	Carga de succión neta positiva requerida	m
O	Aceite (fase oleosa)	-
P_a	Presión atmosférica en el sitio	Pa
$P_{c,1}$	Presión de la fase continua a la entrada del módulo	Pa
$P_{c,2}$	Presión de la fase continua a la salida del módulo	Pa
P_{cap}	Presión de capilaridad	Pa
P_d	Presión de la fase dispersa	Pa
p_{sp}	Presión estática absoluta sobre el fluido en el depósito	Pa
Pm	Perímetro mojado	m
P_v	Presión absoluta de vapor	Pa
p_1	Presión en el punto 1 de la tubería	Pa
p_2	Presión en el punto 2 de la tubería	Pa
Q	Caudal de operación	m^3/h
q_d	Caudal de diseño	m^3/h
r	Radio central de la vuelta de 90°	

Símbolo	Definición	Unidades
r	Radio central de la vuelta de 90°	
Re	Número de Reynolds	Adim
Ri	Radio interior de la vuelta 90°	m
R_p	Radio del poro	m
R_d	Radio de la gota naciente	m
R_o	Radio exterior de la vuelta de 90°	
V_p	Apertura de la válvula	Adim
W	Agua (fase acuosa)	
z_1	Pérdida de carga por elevación en el punto 1 del sistema	m
z_2	Pérdida de carga por elevación en el punto 2 del sistema	m

Letras griegas	Definición	Unidades
α	Razón de regulación de la válvula	Adim
γ	Peso específico	N/m ²
ΔP_d	Caída de presión de la fase a dispersar	Pa
ΔP_{tm}	Diferencia de presión transmembrana	Pa
ΔP_v	Diferencia de presión entre la entrada y la salida de la válvula	Pa
ε_t	Rugosidad de la tubería	Adim
η_c	Viscosidad de la fase continua	Pa.s
η_d	Viscosidad de la fase a dispersar	Pa.s
η_f	Viscosidad del fluido en tubería	Pa.s
θ	Ángulo de contacto	Grados
F_σ	Fuerza que retiene a la gota en la boca del poro	N
ρ	Densidad	Kg/m ³
σ	Tensión superficial/interfacial	N/m
τ_w	Esfuerzo de corte de pared	Pa
v_d	Velocidad de flujo de fase continua a la altura media de la gota	m/s

Letras griegas	Definición	Unidades
v_f	Velocidad de flujo en tuberías	m/s
v_m	Velocidad de la fase continua en un punto superior al de la gota naciente	m/s
v_p	Velocidad de flujo en los poros	m/s
v_1	Velocidad del fluido en la sección 1	m/s
v_2	Velocidad del fluido en la sección 2	m/s

INTRODUCCIÓN

Actualmente existen numerosas aplicaciones de las emulsiones en el área de la industria química, alimenticia, farmacéutica, cosmética, entre otras; la mayoría de los métodos existentes para su producción se basan en el establecimiento de un régimen de flujo turbulento entre dos líquidos inmiscibles dentro de un recipiente, donde, debido a la agitación dentro del mismo, se obtiene la emulsión. Dichos métodos convencionales no son eficientes: En primer lugar, porque la agitación no puede ser cuidadosamente controlada, en consecuencia la distribución del tamaño de gota tampoco se controla; en segundo lugar, la energía no es utilizada de forma adecuada; en tercer lugar, existen limitaciones en el volumen de producción debido al tamaño del recipiente y por último, la dificultad para efectuar el escalamiento del proceso no es fácil de realizar. La técnica de emulsionar con membranas, se desarrolló para superar las limitaciones presentes en los procesos tradicionales.

Por lo expuesto anteriormente se plantea el diseño y construcción de una planta a escala de banco con operación semicontinua para producir emulsiones empleando membranas, lo cual se realizará, en principio a través del estudio de las condiciones de operación y funcionamiento del equipo con operación por cargas que se encuentra en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas, a través de la evaluación de los estudios realizados previamente en la línea de investigación “Emulsiones con membranas”; seguidamente se plantearán las estrategias de solución a los inconvenientes encontrados y posteriormente se ejecutarán las fases de ingeniería de proyectos requeridas para tres ciclos de operación: ciclo de emulsión simple, ciclo de emulsión concentrada y ciclo de emulsión doble, tomando en cuenta las estrategias antes mencionadas. Por último, se analizarán las ventajas y desventajas en relación a los modelos ya existentes a nivel mundial.

Los documentos de ingeniería de proyectos generados incluirán las hojas de especificación de equipos, el plano isométrico de la planta, reportes de los cálculos de las caídas de presión del sistema en el cual se verificará que los valores de operación sean los requeridos para producir emulsiones, partiendo de los resultados obtenidos en las experimentaciones previas realizadas en la línea de investigación “emulsionar

con membranas” y los demás estudios revisados en las que se aplica dicha técnica con operación semicontinua, de tal forma, que la planta a diseñar sea versátil, con rangos de presión y flujo que permitan preparar una amplia variedad de emulsiones. Seguidamente se ejecutará la última fase del proyecto, la construcción de la planta, de acuerdo a las especificaciones obtenidas nombradas previamente. Finalmente, se presentará el manual de operación de la planta, en el cual se detallarán los procedimientos que se deben realizar para producir emulsiones simples, concentradas y dobles de forma correcta, además de los ciclos de limpieza de cada proceso.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una emulsión es un sistema que contiene dos fases líquidas inmiscibles, una de las cuales está dispersa en la otra y cuya estructura es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante (Salager, 1999b). Las emulsiones tienen gran relevancia en la formulación de cosméticos, fármacos, pinturas, alimentos, en la industria del petróleo y en algunos procesos de extracción de solventes (Vladisavljević, Tesch y Shubert, 2002). Tradicionalmente las emulsiones se producen con equipos tales como molinos coloidales, sistemas de rotor-estator y homogeneizadores de alta presión; la elección suele hacerse dependiendo de la aplicación que tendrá la emulsión resultante, la viscosidad aparente, la cantidad de energía mecánica requerida y del requerimiento de intercambio de calor (Joscellyne y Trägård, 2000).

En el caso de la fabricación a pequeña o mediana escala de productos conformados por gotas o partículas finas con propiedades controladas de forma precisa, tales como productos con aplicaciones en electrónica, cuidado médico, alimentos funcionales, propósitos analíticos, etc., entre los que destacan emulsiones múltiples empleadas en sistemas de administración de medicamentos (DDS, drug delivery systems), microportadores de sólidos para la encapsulación de un medicamento o nutriente utilizando aceite comestible sólido a una temperatura elevada, polvo de sílice para HPLC y microesferas monodispersas de polímeros monodispersas; es conveniente aplicar la técnica de “Emulsionar con Membranas” (Vladisavljević y Shubert, 2003).

La producción de emulsiones utilizando membranas es una técnica reciente introducida por Nakashima y Shimizu en el año 1988 y consiste en presurizar la fase a dispersar a través de los poros de una membrana microporosa mientras la fase continua se encuentra en movimiento (fluye o se agita) a lo largo de la superficie de

la membrana. Las gotas crecen en la superficie de los poros hasta que, al llegar a cierto tamaño, se separan (Vladisavljević, Brösel, y Schubert, 2000).

Los dispositivos para producir emulsiones con membranas pueden dividirse en dos grupos, un primer grupo que puede ser utilizado para emulsionar de forma continua o semi-continua y un segundo grupo indicado para procesos por cargas. (Lambrich y Schubert, 2005). Tales dispositivos están constituidos básicamente por los mismos equipos medulares, sin embargo el diseño y la configuración de éstos varía dependiendo de la aplicación. Asimismo, los autores refieren que cada uno de los dispositivos tiene ventajas y desventajas específicas dependiendo de los requerimientos del proceso. Usualmente para aplicaciones de laboratorio es preferible utilizar el equipo por cargas; mientras que si es necesario producir grandes cantidades de emulsión y además se requiere ajustar de forma estricta los parámetros de proceso es deseable operar de modo continuo o semi-continuo.

Los dispositivos que operan de forma continua o semi-continua son potencialmente superiores con respecto a los dispositivos que operan en modo por cargas y a los métodos convencionales para producir emulsiones lo cual se evidencia en las ventajas que se presentan a continuación, según Vladisavljević, et al. (2000):

- (a) Los parámetros de proceso (tasa de efluente de fase discontinua, la velocidad de flujo cruzado, diferencia de presión transmembrana, etc.) que afectan directamente las propiedades y características de las emulsiones obtenidas (distribución del tamaño de gotas y estabilidad) pueden ser cuidadosamente controlados.
- (b) Los esfuerzos de corte generados, son mucho menores, por lo que la energía requerida para el proceso también es menor y además es posible utilizar componentes de la emulsión sensibles al cizallamiento, tales como el almidón y las proteínas.
- (c) La cantidad de emulsionante utilizada es mucho menor que la empleada en los métodos convencionales.

- (d) El proceso opera de forma confiable y es independiente del escalamiento, el cual es posible realizar mediante la adición de varios módulos de membranas (Williams et. al, 1998).

En Venezuela no existen estudios previos en los cuales se haya implementado la técnica de emulsionar con membranas, sin embargo, actualmente en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Módulo V de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, se están preparando emulsiones a través de la línea de investigación “Emulsiones con membranas” utilizando un equipo que opera por cargas. Los recursos con los que se dispone provienen de un proyecto de investigación individual en dos etapas, cada una por un monto de Bs. 15.000,00 identificado con el número P.I. 08-7390-2008/1, y que dispone de la ayuda a la investigación que otorga la Coordinación de Investigación de la Facultad de Ingeniería (Bs. 1.000,00 por año). Adicionalmente se introdujo un proyecto LOCTI denominado “Emulsiones con Membranas”, por un monto de Bs. 500.000,00.

Enmarcados y orientados al desarrollo de esta línea de investigación y tomando en consideración las potenciales ventajas que presentan los dispositivos semicontinuos en comparación con los demás procesos para producir emulsiones expuestas anteriormente, se pretende llevar a cabo el diseño y construcción de una planta a escala de banco con operación semicontinua para emulsionar con membranas, que tenga integrados los dispositivos de control de los parámetros de proceso más relevantes.

El diseño y construcción de dicha planta se ejecutará partiendo de la realización de una evaluación técnica a un equipo por cargas utilizado para producir emulsiones con membranas que se encuentra en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas, con la finalidad de verificar los problemas de operación que deben evitarse en el posterior diseño de la planta requerida. Asimismo, se tomará en consideración el posible uso de varios equipos que se tienen disponibles en el proyecto, los cuales son: un (1) módulo de membranas, una (1) bomba tipo pistón y (2) dos bombas de diafragma, además, se podrán emplear todos los elementos del Filtratec (equipo empleado para emulsionar

por cargas) que aporten beneficios al proceso, esto considerando los costos involucrados y las limitaciones económicas existentes.

La ejecución de dicho trabajo permitirá aumentar la eficiencia en la ejecución del proceso así como también su productividad, haciendo posible la apertura de una ventana de oportunidades tanto para los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, como a otras Instituciones de Educación superior, de igual manera el estudio sería un valioso aporte en el área de emulsiones.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

Diseñar y construir una planta a escala de banco con operación semi continua para la producción de emulsiones empleando membranas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- (a) Evaluar el funcionamiento de un equipo para emulsionar por cargas mediante el estudio y observación de su operación, generando bases para el posterior diseño del equipo semicontinuo.
- (b) Seleccionar las fases de ingeniería de proyectos adecuadas al presente estudio.
- (c) Diseñar la planta a escala de banco con modo de operación semicontinua aplicando las fases de ingeniería de proyectos seleccionadas.
- (d) Construir la planta a escala de banco con operación semi continua para la producción de emulsiones con membranas de acuerdo al diseño realizado.
- (e) Elaborar el manual de funcionamiento de la planta a escala de banco de operación semi continua diseñada para producir emulsiones con membranas.

ANTECEDENTES

A continuación se describen los trabajos realizados para la obtención de emulsiones utilizando membranas; de los cuales se destacan los aspectos relevantes a tomar en cuenta para el desarrollo del presente Trabajo Especial de Grado.

Williams, et al. (1998) obtuvieron dos tipos de emulsiones de aceite en agua con formulaciones específicas para aplicaciones cosméticas utilizando una planta piloto para emulsionar con membranas a flujo cruzado (Figura N°1).

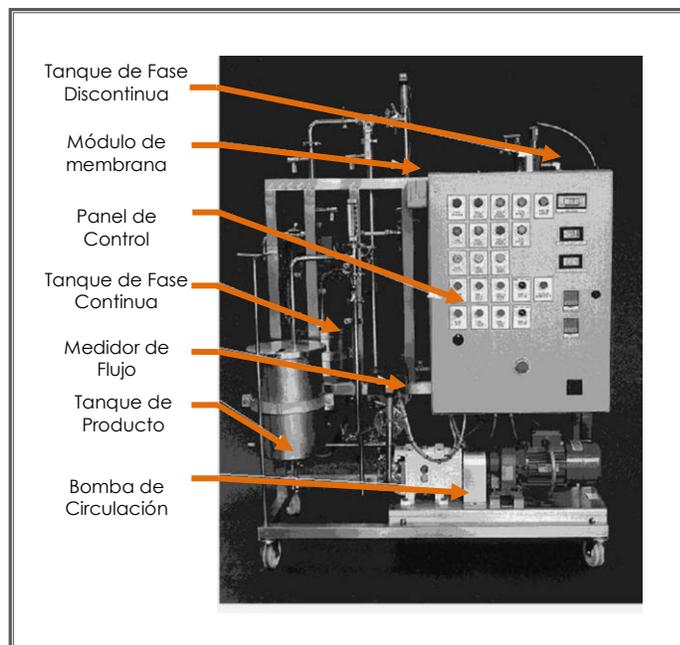


Figura N°1. Diagrama esquemático del aparato para emulsionar con membranas
(Williams et. al., 1998).

La planta está conformada por tres sistemas principales; en primer lugar se tiene el sistema de fase continua integrado por un tanque de almacenamiento de fase continua de diez litros de capacidad (10 L) equipado con cintas de calentamiento, una bomba de lóbulo rotatorio, un medidor de flujo magnético, un módulo para membrana, transmisores de presión antes y después del módulo, intercambiador de calor, agitador y dos válvulas de toma de muestras instaladas después del tanque de almacenamiento. En segundo lugar se tiene el sistema de fase discontinua conformado por un tanque de almacenamiento de cinco litros (5 L) equipado con

cintas de calentamiento, una válvula de un paso para el control de la alimentación de aire, una válvula de seguridad y un regulador de la presión de aire. Por último se tiene el ciclo de producto final conformado por un intercambiador de calor, una camisa de enfriamiento del tanque receptor y un agitador. Asimismo, cada sistema posee un indicador de temperatura en los puntos en los cuales la temperatura debe ser controlada. Además, la planta tiene adaptado un panel de control el cual determina el suministro de energía para los tres sistemas principales a través del control de la velocidad de la bomba, señales del medidor de flujo, transmisores de presión y transmisores de temperatura. Los experimentos para producir dichas emulsiones se obtuvieron operando tanto en modo por cargas como en modo semicontinuo, con dos tipos de membranas tubulares de cerámica cubiertas de alúmina de igual longitud (600 mm), de igual intervalo de tamaño de poro (0,2 a 0,5 μm) y con un diámetro externo de tubo de 10 mm y 20 mm, respectivamente. Dichos experimentos se llevaron a cabo con el objetivo de encontrar los efectos de los parámetros de proceso (diferencia de presión transmembrana y velocidad de flujo cruzado) y la estructura de la membrana sobre el tamaño y la distribución del tamaño de gota de la emulsión. Se comprobó que el tamaño de gota es controlable y la distribución del tamaño de gota puede ser muy estrecha a través de la elección juiciosa de condiciones de proceso tales como la velocidad de flujo cruzado y la diferencia de presión transmembrana, así como también la elección del tamaño de poro adecuado. Además se concluyó que el proceso es reproducible a escala industrial y la emulsión puede tener una alta estabilidad en virtud de los bajos esfuerzos de corte aplicados en comparación con los métodos convencionales.

Joscelyne y Trägårdh (1999), prepararon emulsiones conformadas por aceite vegetal como fase a dispersar y leche descremada con un contenido de grasa <0,1% como medio de dispersión; utilizaron membranas tubulares de α -alúmina (0,2 y 0,5 μm de tamaño de poro) y otra membrana cubierta de zirconia (0,15 μm de tamaño de poro), ambas con diámetro interno de 7 mm, diámetro externo de 10 mm y longitud de 250 mm. La configuración de equipos se muestra en la Figura N°2, en la que se observa un reservorio de fase continua de 2 L de capacidad, fabricado con acero

inoxidable, un módulo monotubular Membralox, un intercambiador de calor y una bomba de engranajes (Iwaki MGD-M15), todos conectados a través de tuberías de acero inoxidable de diámetro igual a 12,5 mm. Del mismo modo se tiene el reservorio de aceite fabricado con Perspex® (polimetilmetacrilato), además de manómetros y termocuplas utilizados para monitorear la presión y la temperatura en los puntos de interés. Con los experimentos realizados concluyeron que (a) el tamaño de gota disminuye mientras el esfuerzo de corte se incrementa y que su influencia es mucho mayor en esfuerzos menores a 30 Pa, es decir, los mayores cambios en el tamaño de gotas ocurre con la aplicación de bajos esfuerzos de corte. (b) El efecto de la disminución del tamaño de gota con el esfuerzo de corte depende del tamaño de poro de la membrana. (c) La presión crítica disminuye con el incremento del tamaño de poro nominal con una concentración de emulsionante del 2% y que (d) la velocidad de flujo puede ser utilizada para controlar el tamaño de gota.

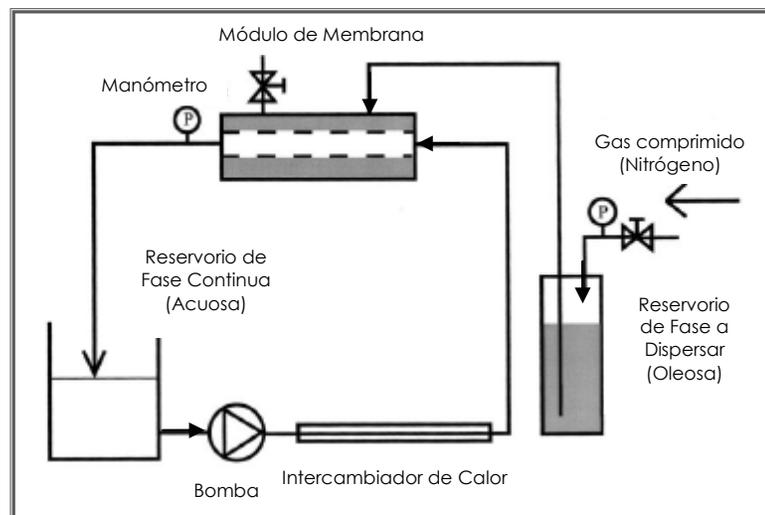


Figura N°2. Vista esquemática del sistema para emulsionar con membranas
(Joscelyne y Trägardh, 1999)

En el año 2000, Vladislavljević, et. al., prepararon exitosamente emulsiones de W/O, compuestas por agua desmineralizada como fase dispersa y aceite mineral Velocite N°3 como fase continua estabilizada con poliglicerol polirricinoleato (PGPR

90) como emulsionante soluble en aceite. Para producir dichas emulsiones se utilizó la configuración de equipos que se observa en la Figura N°3

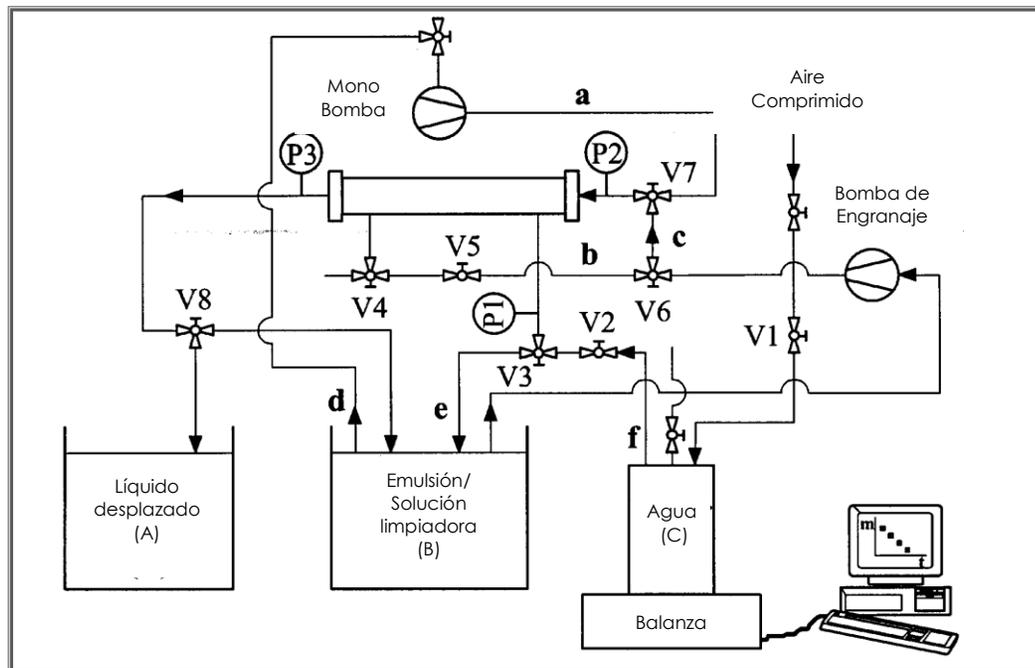


Figura N°3. Diagrama esquemático del aparato de emulsionar con membranas (Vladislavljevic et al., 2000).

Los equipos que se muestran en la figura N°2 son análogos a los mostrados en la figura N°3, sin embargo, en ésta última se muestra un ciclo de limpieza, para lo cual adicionan una Mono bomba a la configuración así como la instrumentación necesaria, además, las emulsiones se prepararon en un módulo de membrana Microdyn, el cual se compone de 40 fibras microporosas huecas de polipropileno con un diámetro interno de 1,7 mm y un tamaño de poro medio de 0,4 μm . La longitud del haz de fibras es de 468 mm y el área efectiva de la membrana es de 0,1 m^2 . Las fibras huecas están fijadas en ambos extremos con resina de poliuretano dentro de una carcasa de polipropileno cilíndrico con un diámetro exterior de 25 mm y una longitud de 500 mm. Luego de preparar las emulsiones en dicho equipo, se demostró que la diferencia de presión transmembrana y la viscosidad de los fluidos empleados afectan directamente el flujo de fase dispersa a través de la membrana y al tamaño de gota promedio, y que este último se incrementa con el aumento de la diferencia de

presión transmembrana y con la disminución de la concentración de emulsionante; además el flujo de fase dispersa disminuye con el tiempo; esto se lo atribuyeron a la obstrucción de los poros de la membrana debido que el aceite (fase continua) los bloquea a causa de su mayor viscosidad. Destacan que la producción de este tipo de emulsiones (W/O) no es común, pues las gotas de agua son más difíciles de estabilizar debido las fuerzas de repulsión eléctrica de doble capa en una fase oleosa con una baja constante dieléctrica.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1. EMULSIONES

Para definir qué son las emulsiones, en primer lugar es necesario introducir la definición de dispersiones coloidales. Las dispersiones coloidales se componen de partículas muy pequeñas que varían en tamaño y que pueden ser sólidas, líquidas o gaseosas (Henry y Heinke, 1999).

Aunque la definición clásica de dispersiones coloidales especifica el tamaño de la partícula entre un nanómetro y un micrómetro, se tiene que frecuentemente en aplicaciones prácticas, que el tamaño límite superior se extiende hasta diez e incluso hasta cientos de micrómetros (Schramm, 2005) y depende esencialmente de la estabilidad del sistema frente a la sedimentación gravitacional (Salager, 1999a).

Las emulsiones son dispersiones coloidales líquido-líquido, es decir, en las cuales un líquido se dispersa en forma de gotas en una fase líquida continua de distinta composición (Schramm, 2005). El líquido que es dispersado en pequeñas gotas es llamado fase discontinua, dispersa o interna; el otro líquido es el medio de dispersión, fase externa o fase continua (Gerbino, 2005). En la mayoría de las emulsiones una de ellas es acuosa mientras que la otra es oleosa (Schramm, 2005). Las emulsiones, son también llamadas macroemulsiones con un tamaño de gota en el rango 1-100 μm , pueden observarse con un microscopio óptico, y en general son sensibles a la gravedad, es decir, sedimentan o creman de acuerdo a la ley de Stokes, siempre y cuando la diferencia de densidad de los dos líquidos no sea despreciable (Salager, 1999b).

Muchas emulsiones son termodinámicamente inestables debido al gran incremento de la energía en su superficie la cual resulta de la combinación de la tensión interfacial, al incremento del área superficial de la fase dispersa y a la diferencia de densidades en ambas fases. Así, las emulsiones tienden a experimentar *segregación*, es decir, el líquido menos denso se desplaza hasta la parte superior y el

líquido más denso cae en el contenedor. Subsecuentemente las gotas pueden sufrir el fenómeno de *coalescencia* debido a la necesidad del sistema por disminuir la energía libre en la superficie. Por consiguiente, para evitar los problemas de estabilidad descritos anteriormente, es necesario utilizar en su preparación agentes emulsionantes (Gerbino, 2005).

2.2. TIPOS DE EMULSIONES

Schramm en el año 2005 indicó que existen dos tipos de emulsiones fácilmente distinguibles, dependiendo del tipo de líquido que forma la fase continua

- (a) De aceite en agua (O/W) cuando las gotas de aceite se encuentran dispersas en agua. En donde la letra O se refiere al aceite y la letra W se refiere al agua (O=Oil y W=water, respectivamente, por sus siglas en inglés).
- (b) De agua en aceite (W/O) cuando las gotas de agua se encuentran dispersas en aceite.

En las situaciones prácticas, las emulsiones existentes no siempre son tan simples, y es posible encontrar emulsiones dobles, tales como emulsiones de aceite en agua en aceite (O/W/O) y de agua en aceite en agua (W/O/W). Por ejemplo, O/W/O, denota una emulsión la cual contiene gotas de aceite dispersas en gotas acuosas de mayor tamaño que a su vez se encuentran dispersas en una fase continua de aceite. Lo expuesto anteriormente se encuentra representado en la Figura N°4:

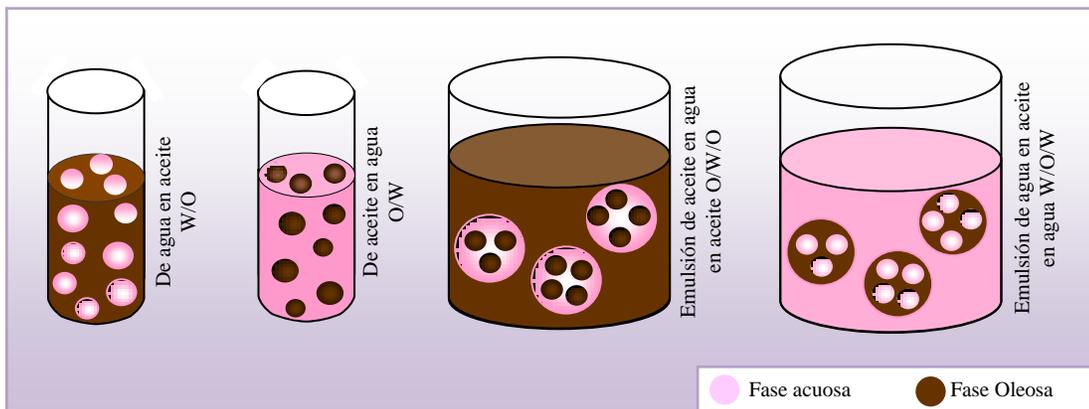


Figura N°4. Tipos de Emulsiones

2.3. PROPIEDADES DE LAS EMULSIONES

Las propiedades de las emulsiones dependen de muchos factores: la fase continua, la temperatura, tamaño de gota promedio, distribución de tamaño de gota, la cantidad de fase oleosa dispersa en la fase acuosa, y otros aditivos, tales como emulsionantes y cosurfactantes, entre otras sustancias presentes. Dos importantes propiedades de las emulsiones son su estabilidad, y sus propiedades de flujo, en otras palabras, su reología. A continuación se describen además de éstas, las restantes propiedades que caracterizan a las emulsiones.

La medición de la *conductividad eléctrica* en la fase acuosa, permite determinar el tipo de emulsión que se tiene: O/W (alta conductividad) o W/O (baja conductividad) (Chattopadhyay y Mittal, 1996). Se expresa en $\text{Ohmio}^{-1} \cdot \text{Centímetros}^{-1}$ ($\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$) o Siemens por Centímetros (S/cm), una alta conductividad puede ser, por ejemplo 0,01 S/cm ó 10 mS/cm, la cual corresponde a una solución salina al 1% de cloruro de sodio; en contraste se tiene la conductividad de las sustancias aceitosas u orgánicas con valores en el orden de algunos $\mu\text{S/cm}$.

El *comportamiento reológico* de una emulsión es una propiedad que depende de diversos factores de carácter físico y de carácter fisicoquímico, los cuales dirigen su comportamiento. Los principales factores son la proporción de la fase interna, tamaño de las gotas de la fase interna, de la formulación y viscosidad de la fase externa.

La duración de las emulsiones puede variar considerablemente de un sistema a otro y puede variar de unos minutos a muchos años dependiendo de la naturaleza del surfactante, la naturaleza de ambas fases y la relación entre su volumen. La *estabilidad* de una emulsión requiere de atención particular, pues no existe un procedimiento estándar o absoluto para estimarla. En primer lugar depende de la situación de la emulsión, si se presenta un campo de gravedad natural o artificial, si se encuentra en reposo o está siendo agitada de alguna forma, etc., (Chattopadhyay y Mittal, 1996). La única medida realmente absoluta de la estabilidad de una emulsión es la variación de la distribución de tamaño de gotas en función del tiempo.

2.4. SURFACTANTES Y TIPOS

Surfactante es un término que normalmente se utiliza para designar en forma abreviada a los compuestos con actividad interfacial. Químicamente, los surfactantes se caracterizan por tener una estructura molecular que contiene un grupo que posee poca atracción, o antipatía por el solvente, conocido como grupo hidrofóbico (en caso de tener como solvente el agua), junto a otro grupo que tiene fuerte atracción, o apetencia por el solvente, llamado el grupo hidrofílico. Normalmente, el grupo hidrofóbico es una cadena de carbonos lineal o ramificada, mientras que la porción hidrofílica es un grupo con cierto carácter polar, la cual posee afinidad por los solventes polares en particular el agua (Rivas y Gutiérrez, 1999).

Desde el punto de vista comercial los surfactantes se clasifican de acuerdo a su uso, es decir a su propiedad de mayor interés práctico en cuanto a la aplicación: jabón, detergente, emulsionante, bactericida, inhibidor de corrosión, dispersante, tensoactivo, humectante, etc. Por ejemplo, los surfactantes no iónicos son buenos humectantes, detergentes y emulsionantes; los surfactantes aniónicos son buenos detergentes y los surfactantes catiónicos son bactericidas y tienen propiedades particulares. Por ello, es conveniente realizar una clasificación según el tipo de disociación del grupo hidrofílico en fase acuosa, la cual se muestra en la Figura N°5, así como también una breve definición de éstos.

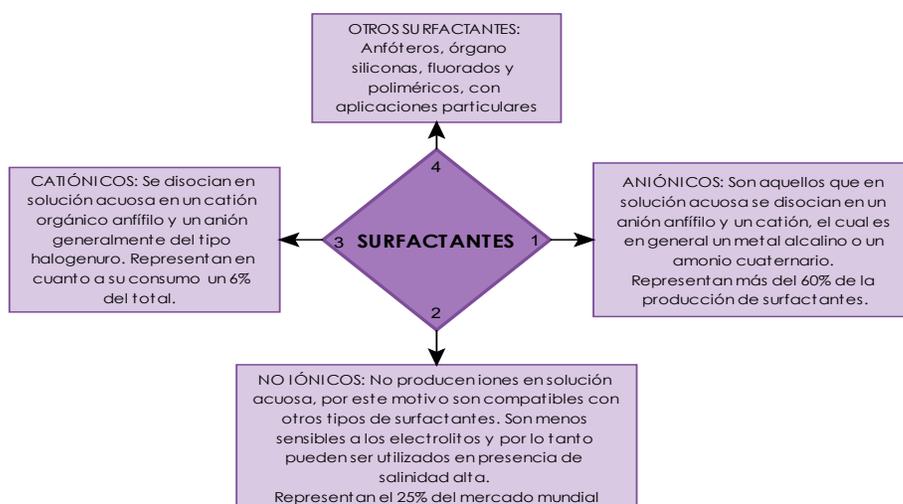


Figura N°5. Clasificación de Surfactantes (elaboración propia)

2.5. EMULSIONAR CON MEMBRANAS

La técnica de emulsionar con membranas a flujo cruzado (XME, por su siglas en inglés), descubierto por Nakashima y Shimizu en 1991 (Aguilera y Lillford, 2008), es potencialmente superior a otras técnicas para emulsionar, lo cual se evidencia en las siguientes ventajas:

- (a) Los campos de flujo aplicados son mucho más leves.
- (b) El consumo de energía es mucho menor.
- (c) Cada gota es formada individualmente en la “boca” o salida de cada poro y su tamaño depende fuertemente de la forma y la dimensión de los poros de la membrana.
- (d) Las emulsiones producidas son altamente monodispersas, sin embargo, la tasa de flujo de fase a dispersar a través de la membrana es relativamente baja, lo que lo convierte en un método adecuado para producir volúmenes pequeños de emulsiones de alto valor agregado con una cantidad de fase dispersa más baja.

El concepto de emulsionar con membranas es simple e implica la inyección de una fase (fase a dispersar) a través de un sustrato poroso (membrana) mediante la aplicación de una determinada presión transmembrana, de tal manera que las gotas formadas al final de los poros en la superficie de la membrana sean arrastradas por una segunda fase (la fase continua) la cual se encuentra a una velocidad de flujo cruzado específica, dicho proceso se encuentra representado en la Figura N°6. Es importante destacar que en dicha figura se tiene representada una membrana tubular y el flujo de fase dispersa mostrado puede ir en la dirección indicada, es decir, desde el lado anular hacia el lado del tubo o en la dirección contraria (desde el tubo hacia el ánulo).

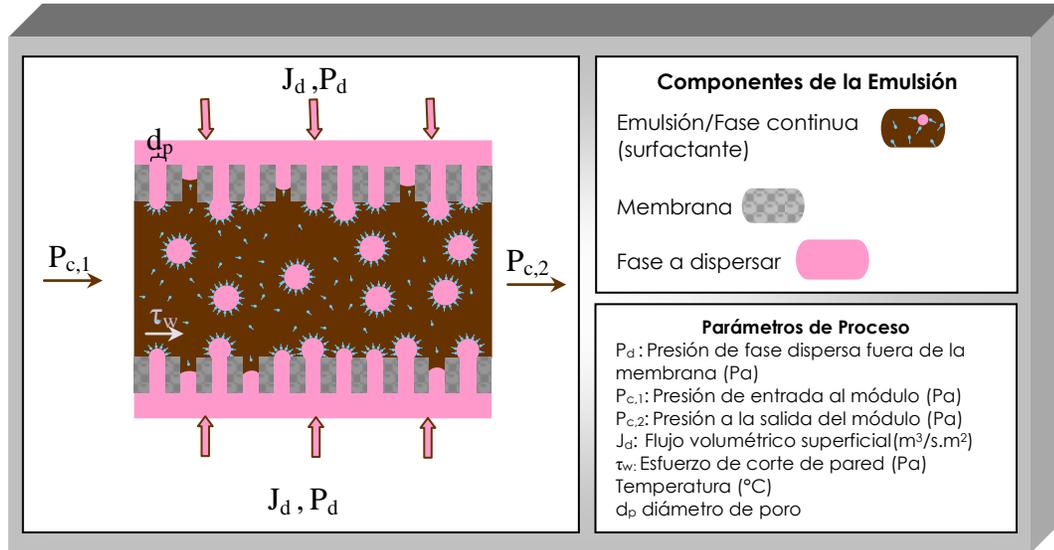


Figura N°6. Principales parámetros que influyen en el proceso de emulsionar con membranas (Vladisavlević y Shubert, 2003)

A continuación se describen los parámetros que influyen en el proceso.

En principio se tiene que el proceso está afectado por distintos tipos de presión, *la presión capilar* se define como la presión mínima necesaria para que la fase a dispersar comience a fluir a través de los poros de la membrana (Peng y Williams, 1998):

$$P_{cap} = \frac{4\sigma\cos\theta}{d_p} \quad (\text{Ec. 1})$$

También se tiene *la caída de presión* (ΔP_d) de la fase a dispersar cuando ésta comienza a fluir a través de los poros de la membrana, puede ser estimada a través de la Ley de Hagen Poiseulle (Lambrich y Shubert, 2005):

$$\Delta P_d = \frac{32\eta_d l_p v_p}{d_p^2} \quad (\text{Ec. 2})$$

Por último, dentro de las presiones involucradas en el proceso, está *la diferencia de presión transmembrana* (ΔP_{tm}), expresada como:

$$\Delta P_{tm} = P_d - \frac{(P_{c,1} + P_{c,2})}{2} \quad (\text{Ec. 3})$$

Así se tiene que si la presión de la fase dispersa es muy baja ($\ll P_{cap}$), la fase discontinua no podrá circular a través de los poros de la membrana y si la presión es

muy alta ($\gg P_{cap}$) la fase discontinua puede ser forzada a salir en forma de chorro y producir gotas extremadamente grandes o de tamaño variable (Williams et al.; 1998).

Por otra parte, se tiene como parámetro el *esfuerzo de corte de pared*: las gotas que se forman en la interfase membrana/fase continua se separan de la superficie de la membrana bajo el efecto de las fuerzas de arrastre que ejerce el flujo de fase continua sobre la gota; la distribución de tamaño de gota se hace más pequeña a medida que aumenta el esfuerzo de corte de pared, sin embargo, por encima de cierto valor, la distribución del tamaño de gota no puede disminuir mucho más (Lambrich y Schubert, 2005). En los intervalos de tamaño de gota obtenidos usualmente, todas las demás fuerzas, tales como la gravedad (flotabilidad) y las fuerzas de elevación inercial, son despreciables.

La magnitud de la fuerza de arrastre sobre la gota puede ser estimada con la ayuda de la Ley de Stoke's (Ecuación N°4). El factor 1.7 se agrega debido al campo de velocidad no homogéneo alrededor de la gota (Aguilera y Lillford, 2008):

$$F_d = -1,7(6\pi\eta_c R_d v_d) \quad (\text{Ec. 4})$$

En la Figura N° 7 mostrada a continuación, se pueden observar dichos elementos, además de v_m (m/s) que es la velocidad de la fase continua en un punto superior a la gota naciente.

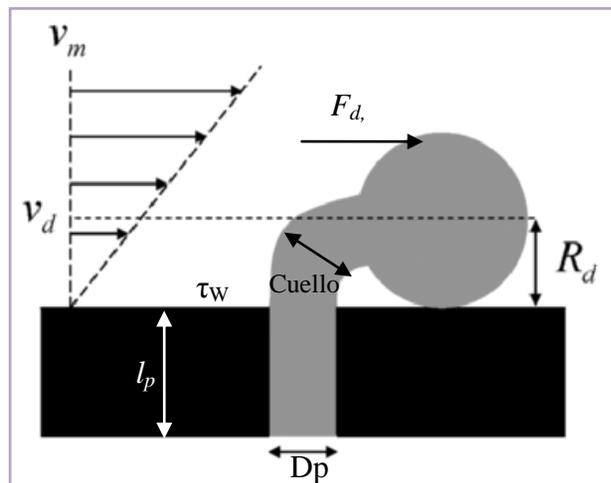


Figura N° 7. Representación del crecimiento y salida de la gota del poro de la membrana (Rayner y Trägårdh, 2005)

El valor de v_d puede ser estimado con el esfuerzo de corte de pared (τ_w), ya que:

$$\tau_w = -\eta_c \frac{v_d}{R_d} \quad (\text{Ec. 5})$$

Sustituyendo esta ecuación en la ecuación anterior, queda:

$$F_d = -10.2\pi R_d^2 \tau_w \quad (\text{Ec. 6})$$

La fuerza que retiene a las gotas en la boca del poro es generada por la tensión interfacial:

$$F_\sigma = 2\pi\sigma R_p \quad (\text{Ec. 7})$$

El cuello, el cual retiene la gota en la boca del mismo, es aproximadamente de la misma magnitud que la del poro y este a su vez es más pequeño que el tamaño de gota.

Equiparando estas fuerzas se obtiene el balance de fuerzas en la gota:

$$F_\sigma + F_d = 0 \quad (\text{Ec. 8})$$

$$2\pi\sigma R_p = -10.2\pi R_d^2 \tau_w = 0 \quad (\text{Ec. 9})$$

Simplificando queda:

$$\tau_w = \frac{0,19\sigma R_p}{R_d^2} \quad (\text{Ec. 10})$$

Esta expresión demuestra la relación entre las fuerzas de arrastre y las fuerzas debidas a la tensión interfacial sobre la gota. Tan pronto como la fuerza de arrastre excede la fuerza de retención de la gota, ésta se separará de la superficie de la membrana y se moverá en conjunto con la fase continua. Asimismo, se puede observar que al reducir el tamaño de los poros de la membrana las gotas se hacen más pequeñas (Lambrich y Shubert, 2005).

En la práctica esta relación (Ec. 10) da una tendencia correcta, sin embargo no proporciona una buena predicción cuantitativa del tamaño de gota obtenido, pues se basa en dos suposiciones ideales: la primera es la esfericidad de las gotas y la segunda la invariabilidad de la tensión interfacial (Joscelyne y Tragard, 2000).

Una expresión que relaciona la velocidad de la fase continua con el esfuerzo de corte es la siguiente (Abrahamse, 2002):

$$\tau_w = 8\eta_c \cdot \frac{v_c}{2h} \quad (\text{Ec. 11})$$

En donde h es la altura del canal de flujo cruzado (m).

Luego se tiene el *flujo de fase dispersa* el cual está relacionado directamente con la diferencia de presión transmembrana; al incrementar la diferencia de presión transmembrana aumenta el flujo de fase dispersa a través de la membrana según la Ley de Darcy (Charcosset, 2009):

$$J_D = \frac{K \cdot \Delta P_{tm}}{\eta_{d.e}} \quad (\text{Ec. 12})$$

En los casos en donde se puede suponer que la membrana tiene n poros cilíndricos (poros ideales), la permeabilidad viene dada por la ecuación de Hagen Poiseuille (Charcosset, 2009):

$$K = \frac{\eta_d R_p^2}{8\pi} \quad (\text{Ec. 13})$$

Con respecto a los *tipos de membranas* existen de geometría plana, de espiral, de fibra hueca y tubular. Se pueden encontrar de distintos materiales, las planas usualmente son de polímeros (polipropileno, acetato de celulosa, politetrafluoroetileno (PTFE), polisulfona, con cubierta de alúmina, de zirconio, etc) y las tubulares son de cerámica o de vidrio poroso Shirasu (SPG, Shirasu Porous Glass), ver Figura N° 8.

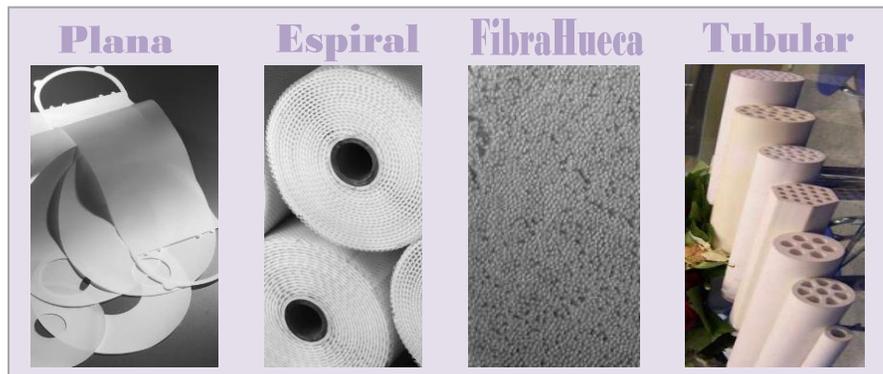


Figura N°8. Tipos de membranas. (Microdyn Nadir® s.f. y Jiuwu Hitech®)

Existen en el mercado módulos para cada tipo de membrana los cuales se muestran en la Figura N°9; se seleccionan dependiendo de la aplicación (microfiltración, nanofiltración, diálisis, ultrafiltración, ósmosis inversa), consideraciones económicas, que sea de fácil limpieza y operación, de fácil mantenimiento y que en su estructura tengan la posibilidad de reemplazar las membranas luego de ser utilizadas (Wang, Hung y Shamas, 2006). Actualmente, dichos módulos no son diseñados específicamente para la producción de emulsiones, sin embargo, en algunas investigaciones se han utilizado módulos para membranas de fibras huecas Microdyn®, tal es el caso de Vladislavljević, Tesch y Shubert (2002).

Membranas de silicon y microtamices de nitruro de silicio, así como también membranas de cerámica (Membraflow®) que han sido diseñadas para microfiltración, se han utilizado para producir emulsiones (Charcosset, 2009).

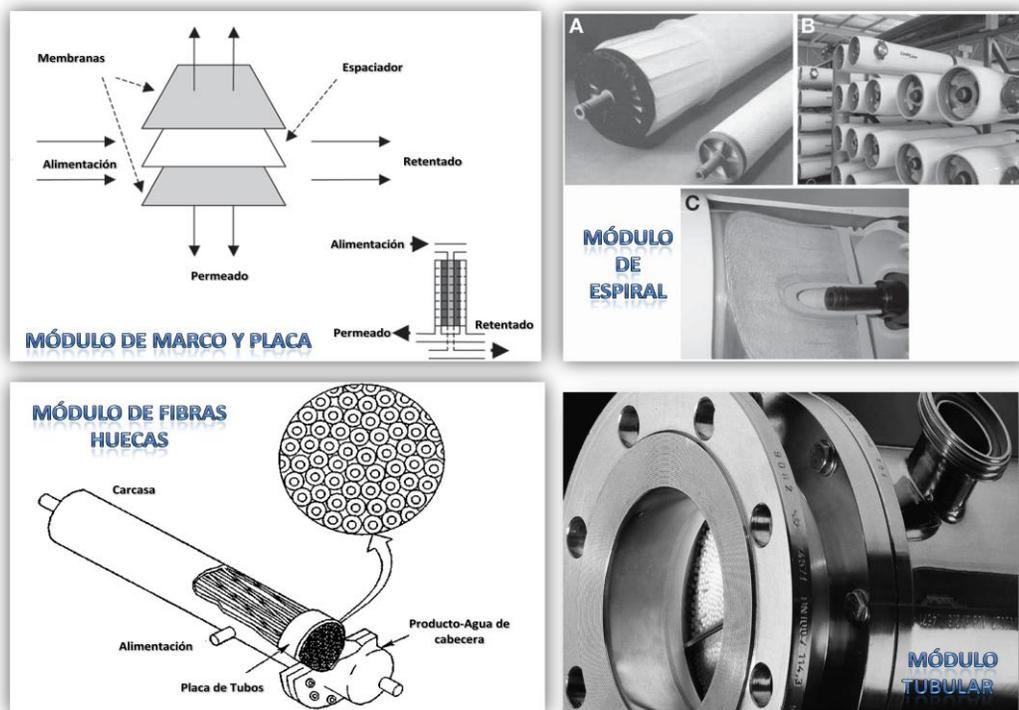


Figura N°9. Tipos de módulo de membranas (Microdyn Nadir (s.f.) ;Wang, Hung y Shamas, 2006)

Una propiedad que se debe tomar en cuenta al momento de adquirir las membranas es la porosidad, una alta porosidad (poros adyacentes muy cercanos)

puede ocasionar coalescencia y una baja porosidad puede disminuir el riesgo de acción de este fenómeno (Williams et.al., 2005). La afinidad de la membrana es otra propiedad importante, puede ser hidrofílica o hidrofóbica, para preparar emulsiones O/W se recomienda utilizar membranas hidrofílicas y utilizar las hidrofóbicas para preparar emulsiones W/O, esto es, porque para producir una emulsión, la fase a dispersar no debe mojar los poros de la membrana (Joscelyne y Trägårdh, 2000)

Por otra parte se tiene como parámetro en el proceso de emulsionar con membranas *la temperatura*, la cual afecta directamente tanto la viscosidad de la fase continua como la viscosidad de la fase a dispersar, a la naturaleza del emulsionante y su solubilidad. El efecto de la temperatura en los surfactantes se describe a continuación.

- (a) Surfactantes iónicos: La solubilidad de los surfactantes iónicos tiende a aumentar con el incremento de la temperatura, sin embargo a partir de una temperatura específica denominada “Temperatura Kraft” se observa que la solubilidad aumenta muy rápidamente y puede llegar a una miscibilidad en todo el rango de composición unos pocos grados después. Lo que indica que el modo de solubilización del surfactante cambia, de solubilización monomolecular, pasa a ser una solubilización micelar (Salager, 1993).
- (b) Surfactantes no iónicos: Al calentar progresivamente una solución de surfactante no iónico se puede observar (de preferencia con luz incidente) una opalescencia que evidencia la transición del comportamiento de fase, este punto se denomina punto de turbidez, ocurre debido a la disminución de las interacciones de solvatación de los átomos de oxígeno. Lo que ocurre es que el surfactante forma una fase separada en forma de pequeñas gotitas que son las que producen la turbidez, si se sigue calentando por encima del punto de turbidez, aparecen gotas que sedimentan y finalmente se produce una separación de fases. El punto de turbidez corresponde a la temperatura a la cual se inicia una transición de fase, separándose de la solución acuosa, una fase que contiene surfactante con un poco de agua (Salager, 1993)

(c) Además existen membranas que se descomponen o pierden sus propiedades al superar cierto valor de temperatura, por ejemplo, las membranas planas Advantec® de acetato de celulosa tienen una temperatura máxima de operación de 180°C y las hidrofílicas de politetrafluoroetileno (PTFE) tienen una temperatura máxima de operación de 100°C, las membranas Jiuwu Hitech® de cerámica cubiertas de alúmina o zirconio tienen una temperatura máxima de operación de 150°C, y así sucede de forma análoga con los otros tipos de membranas.

2.6. ELEMENTOS INVOLUCRADOS EN EL DISEÑO DE UNA PLANTA A ESCALA DE BANCO PARA EMULSIONAR CON MEMBRANAS

En esta sección se describirán los elementos que serán tomados como base para el diseño de la planta a escala de banco. En principio se enumerarán las características de una planta a escala de banco, se definirá la operación por cargas, continua y semicontinua en el proceso de emulsionar con membranas, se definirán los tipos de diseño plausibles y posibles, luego se describirán las fases de la ingeniería de proyectos y las consideraciones del diseño de equipos.

2.6.1. Planta a escala de banco

En la Figura N° 10 se puede observar la ubicación de la planta a escala de banco, dentro de la clasificación de las plantas de acuerdo a sus capacidades.

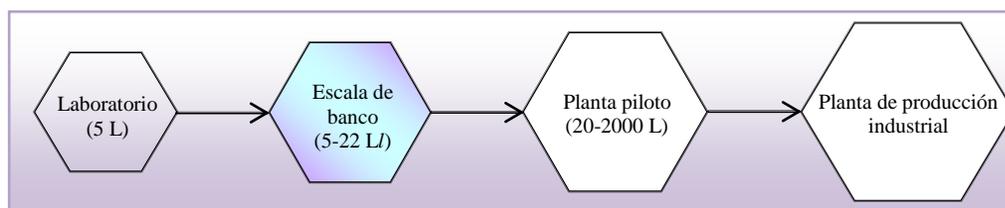


Figura N° 10. Clasificación de las plantas de acuerdo a su capacidad (Lowenstein, 1985).

Además las plantas a escala de banco usualmente poseen las siguientes características:

(a) Ocupan de 0,5 a 1 m² de espacio físico.

(b) Utilizan tuberías de 1/16” a 1/4” de diámetro, aproximadamente.

2.6.2. Modo de Operación

En general, las plantas pueden operar de tres formas: por cargas o batch, de forma semicontinua o de forma continua. A continuación se describen los procedimientos de operación de interés para el presente Trabajo Especial de Grado.

Operación por cargas: En este tipo de proceso la fase a dispersar es presurizada de un lado a otro de la membrana (si es una membrana plana), la cual se encuentra sumergida en el envase agitado contenedor de la fase continua, ésta se encuentra en movimiento dentro del envase, separando las gotas de la superficie de la membrana. En el proceso por cargas de emulsionar con membranas, el esfuerzo de corte de pared es apenas evaluable (Lambrich y Shubert, 2005).

Operación continua y semicontinua: En el proceso de emulsionar de forma continua y semicontinua la fase continua es bombeada a través de un *módulo que contiene la(s) membrana(s)*. La fase continua fluye paralelamente a la superficie de la membrana, con lo que se separan y se recogen las gotas. Si la membrana utilizada es tubular, la fase a dispersar se presiona del exterior al interior del tubo o viceversa, si es plana la fase a dispersar se presiona de un lado a otro de la misma. Después de salir del módulo de la membrana, la emulsión se recircula con el fin de aumentar la fracción de fase dispersa o es directamente remitida para su procesamiento posterior (Lambrich y Shubert, 2005).

Williams et. al. (1998), indican que es posible que un sistema para producir emulsiones con membranas opere de forma semicontinua o por cargas, de ser necesario, si éste tiene los accesorios y equipos adecuados.

2.6.3. Proceso de Diseño

El proceso de diseño puede llevarse a cabo siguiendo el proceso iterativo mostrado en la Figura N°11, la cual plantea que el proceso de diseño parte de un objetivo, para cumplirlo en principio se deben recopilar datos, propiedades físicas y

criterios de diseño de equipos, es decir toda la información que se requiera como base para el diseño.

Tomando en cuenta esto último se procede a la generación de posibles diseños, este proceso se retroalimenta con la información que se obtuvo previamente hasta que se considere que se ha cumplido con la especificación de diseño planteada inicialmente, momento en el cual se .procede a la evaluación de los mismos y a la selección del mejor, a este proceso se le denomina optimización, el diseño seleccionado será el diseño final.

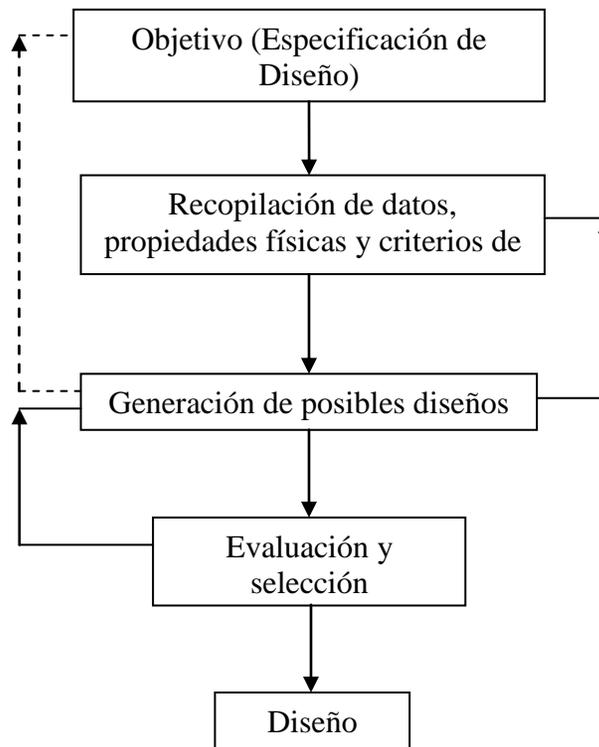


Figura N°11. Esquema iterativo del proceso de diseño (Sinnott et. al., 2005)

Cuando se consideran varios caminos para lograr el objetivo, el diseñador estará limitado por muchos factores, los cuales reducirán el número de posibles diseños, pero no es frecuente que sólo exista una solución posible al problema, de hecho, existirán varias posibles soluciones al problema, dependiendo de la naturaleza de las limitaciones.

Las limitaciones a las posibles soluciones de problemas de diseño son de varios tipos, algunas serán fijas e invariables, tales como las leyes físicas y regulaciones gubernamentales, estas limitaciones están fuera de la influencia del diseñador y establecen el límite exterior de los posibles diseños. Dentro de este límite habrá una serie de diseños plausibles, fijado por las otras restricciones, que son más flexibles y le permiten al diseñador seleccionar el mejor diseño, sobre estas limitaciones el diseñador tiene el control, tales como la elección del proceso y sus condiciones, la elección de materiales y equipos, etc. (Figura N°12)

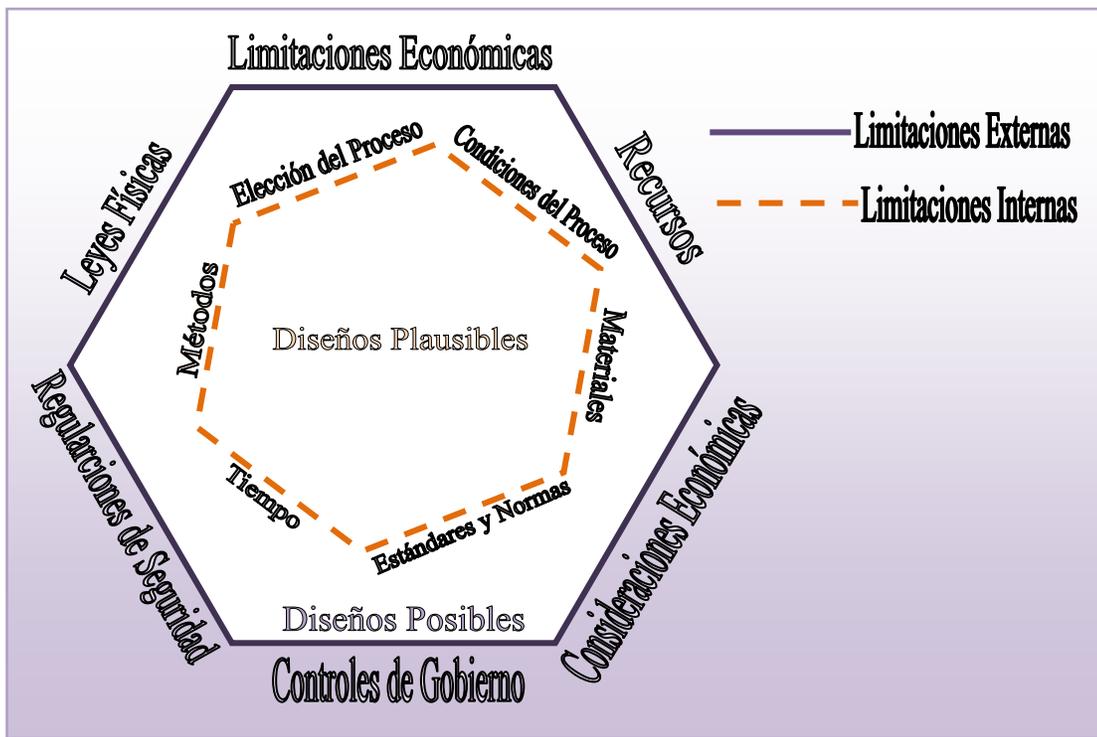


Figura N°12. Limitaciones en los procesos de diseño (Sinnott et. al., 2005)

2.6.4. Fases de la Ingeniería de Proyectos

Un proyecto es la resolución técnica a un problema, es crear productos o servicios únicos que agreguen valor o provoquen un cambio beneficioso; tiene un principio, que corresponde a la generación de una idea; un crecimiento y desarrollo, relacionados con la formulación del mismo; una madurez, en las fases de ejecución y operación, por último un ocaso, coincidente con su obsolescencia y desaparición

(García, 2002). En general el proyecto incluye el desarrollo sucesivo en fase o etapas íntimamente relacionadas (Vepica, s.f.).

Las fases de la ingeniería de proyectos se presentan a continuación en la Figura N°13.

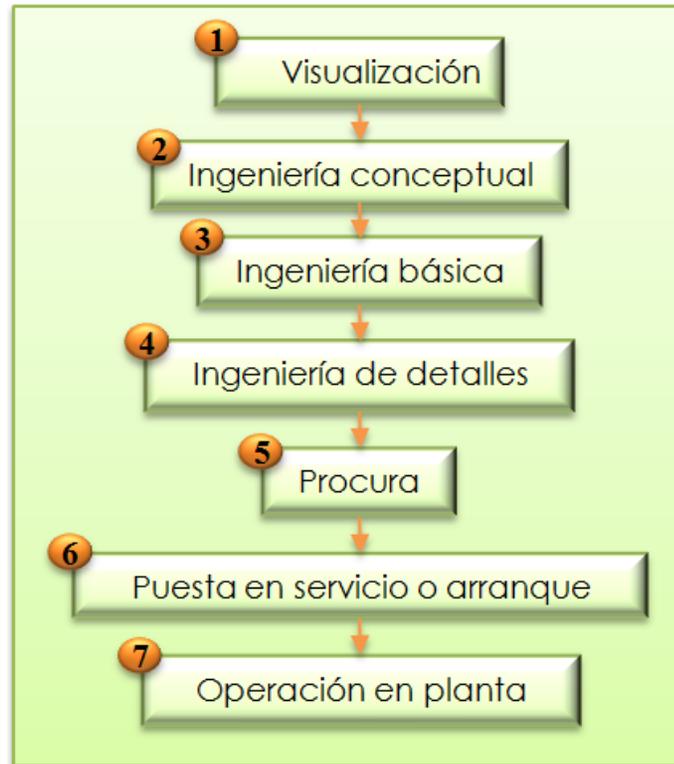


Figura N°13. Fases de la Ingeniería de Proyectos

El alcance del presente Trabajo Especial de Grado incluye las seis primeras etapas (visualización, ingeniería básica, ingeniería conceptual, ingeniería de detalles, procura y puesta en servicio o arranque), las cuales se describen a continuación:

2.6.4.1. Visualización:

La visualización es la etapa en la que se representan las primeras ideas del proyecto a ejecutar, ideas que son reflejadas en la creación de una imagen visual del mismo, que posteriormente facilitará su ejecución. El principal producto de la visualización es la obtención de un esquema global del diseño, en el que se incluyan sus principales características y restricciones de proceso.

2.6.4.2. Ingeniería Conceptual:

El punto de partida de la ingeniería conceptual son los estudios de preinversión (perfil, prefactibilidad y factibilidad) que de alguna forma definen la profundidad de la decisión técnica del proyecto. No obstante, una vez que se toma la decisión de ejecutar el proyecto, se revisan y ponderan las propuestas tecnológicas de forma tal que se pueda elegir el mejor modelo que responda al compromiso. Comienza entonces la planeación de la ejecución donde la ingeniería conceptual se desarrolla y profundiza dando respuestas válidas en términos de costos, tiempos y calidad, se fija un costo mínimo del proyecto y se define un camino para las actividades siguientes de adquisiciones y construcción (Miranda, 2004).

Los productos que se generan en el desarrollo de la ingeniería conceptual, son (Vepica, s.f):

- (a) Bases del estudio (preliminares): descripción de las instalaciones, parámetros de ubicación de la planta (planes de desarrollo, etc), selección del sitio, capacidad de la planta, definición de procesos y servicios, servicios especiales (muelles, residencias, etc.), confiabilidad, filosofía de diseño, calidad, seguridad y protección, criterios especiales de diseño, pruebas de laboratorio para demostración del proceso, selección del o los procesos implícitos o tecnologías, estimado de horas hombre (h-h) a ser utilizadas en la ingeniería básica.
- (b) Diagrama de bloques.
- (c) Diagrama de flujo de procesos (preliminar).
- (d) Estimado de costos clase III.

2.6.4.3. Ingeniería Básica:

Se basa en los resultados obtenidos en la ingeniería conceptual y define en forma definitiva las bases y los criterios tecnológicos del diseño; elabora la diagramación general del proyecto y define los flujos de proceso; entrega especificaciones técnicas detalladas de los equipos, maquinaria y herramientas con fines de cotización, fabricación y compra y verifica los presupuestos de costos directos del proyecto

(Miranda, 2004). Los productos obtenidos se muestran a continuación en la Tabla N°1.

Tabla N°1. Productos de la ingeniería básica (Vepica, s.f.)

<i>Ingeniería de Procesos</i>	<i>Ingeniería de Instrumentación</i>
Bases y criterios de diseño, plano de Implantación de equipos (Plot Plan), plano de rutas de tuberías, especificaciones generales de equipos, hojas de datos técnicos, requisiciones de ingeniería (Procura), revisión y completación de los DTIS, listas de equipos, tuberías y materiales, memorias de cálculo, descripción del sistema contra incendio, descripción del alcance de trabajos mecánico, lista de puntos de enlace (<i>Tie in</i>), diagrama metalúrgico.	Bases y criterios de diseño, revisión y completación de los DTIS, diagramas de simbología, filosofía de control y seguridad, especificaciones generales de instrumentación, hojas de datos de instrumentos, índice de instrumentos, lista de instrumentos / válvulas, memorias de cálculo, requisiciones de ingeniería, cómputos métricos, diagramas de instrumentación, descripción del alcance de trabajos de instrumentación.
<i>Ingeniería Eléctrica</i>	<i>Ingeniería Civil</i>
Bases y criterios de diseño, diagrama unifilar general, Análisis de carga, clasificación de áreas, especificaciones de equipos, disposición de equipos eléctricos (planta y cortes preliminares), ruteo preliminar de cables de fuerza y control, líneas de transmisión, memorias de cálculo, filosofía de control e interfase con instrumentación, diagramas de conexión de motores, cómputos métricos, requisiciones de materiales y equipos, descripción del alcance de trabajos de electricidad	Bases y criterios de diseño, estudios geotécnicos, estudios de suelos estudios de evaluación de impacto ambiental, movimiento de tierra (topografía original y modificada), levantamiento de información de campo, predimensionamiento de fundaciones, predimensionamiento de edificaciones y estructuras, vialidad / Drenajes / Servicios, cómputos métricos, requisiciones de materiales, descripción del alcance de trabajos civiles análisis de riesgos de inversión, informe de estimado de costos clase II.
<i>Ingeniería Mecánica</i>	
Bases y criterios de diseño, plano de Implantación de equipos (Plot Plan), plano de rutas de tuberías, especificaciones generales de equipos, hojas de datos técnicos, requisiciones de ingeniería (Procura)	Revisión y completación de los DTIS, listas de equipos, tuberías y materiales, memorias de cálculo, descripción del sistema contra incendio, descripción del alcance de trabajos mecánico, lista de puntos de enlace (<i>Tie in</i>), diagrama metalúrgico.

Vepica (s.f)

Es importante destacar que enmarcados en los objetivos planteados en el presente Trabajo Especial de grado se desarrollarán los productos indicados en “Ingeniería de procesos” así como también algunos documentos correspondientes a las demás especialidades que sean relevantes y enriquecedores en el presente estudio, como por ejemplo la lista de instrumentos/válvulas, plano de rutas de tuberías, estimado de costos Clase II, entre otros.

2.6.4.4. Ingeniería de detalle:

Le corresponde determinar las especificaciones técnicas definitivas con la elaboración de planos, gráficos y diagramas con todo el respaldo documentario, diseño y dimensionamiento de los equipos principales y complementarios, distribución de los equipos, entre otros (Miranda, 2004). Su desarrollo estará fundamentado en lo ejecutado en la etapa de ingeniería básica. No obstante, al iniciarse este proceso, se realizará una revisión de esta última, a fin de adecuar el

Proyecto a posibles nuevas exigencias. El producto de esta etapa es la logística o plan con todas las especificaciones y recaudos necesarios para el arranque del proyecto (Vepica, s.f)..

2.6.4.5. Procura y puesta en servicio o arranque:

El objetivo de esta fase es construir o poner en funcionamiento el sistema proyectado en las fases anteriores. En esta fase el sistema imaginado se hace realidad. De los modelos gráficos o prototipos se pasa a la escala real y se tienen que verificar todos los supuestos definidos en el proyecto. En esta fase intervienen muchos agentes: promotor, proyectista, administración y diversos proveedores, constructores y contratistas. Se maneja un volumen de dinero muy importante y el coste real de la realización del proyecto se tiene que ajustar al presupuesto indicado en el mismo (Gómez-Senent, 1997).

2.6.5. Consideraciones de diseño de equipos

Al momento de realizar el diseño de los equipos, se deben tener en cuenta distintos criterios referidos a las características del equipo en cuestión, los requerimientos del proceso y los equipos disponibles. En las secciones subsiguientes, en primer lugar se definirá cómo calcular la energía en un sistema de tuberías, los criterios para el dimensionamiento de las mismas, características de las bombas de desplazamiento positivo, selección de válvulas y accesorios y de los recipientes a presión, ya que son los equipos de interés en el presente Trabajo Especial de Grado.

2.6.5.1. Cálculo de la energía en un sistema de tuberías:

La variación (adición o pérdida) de la energía del sistema se debe a las características del mismo, y en general, pueden clasificarse como sigue.

- (a) Rozamiento en las paredes de la tubería: es función de la rugosidad de la superficie interior de la misma, del diámetro interior de la tubería y de la velocidad, densidad y viscosidad del fluido y se expresa en metros (m) de fluido.

$$h_t = f \cdot \frac{L}{D_i} \cdot \frac{v_f^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Ec. 14})$$

Dicha ecuación se conoce como la Ecuación de Darcy, es válida para calcular pérdidas de energía en secciones largas y rectas de conductos circulares, tanto para flujo laminar como para flujo turbulento (Mott, 2006). El factor de fricción f está relacionado con el esfuerzo cortante en la pared del tubo, depende del número de Reynolds y de la rugosidad en la tubería, para el acero comercial la rugosidad es igual a $4,5 \cdot 10^{-5}$ m y para el plástico es igual a $3 \cdot 10^{-7}$ m. El número de Reynolds (adimensional) está dado por la ecuación (Sinnott, Coulson y Richardson, 2005):

$$Re = \frac{\rho \cdot v_f \cdot D_i}{\eta_f} \quad (\text{Ec. 15})$$

El área de flujo circular se calcula con la siguiente ecuación:

$$A_f = \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2}\right)^2 \quad (\text{Ec. 16})$$

Si el área de flujo no es circular el número de Reynolds se calcula con la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_f \cdot 4 \cdot R_h}{\eta_f} \quad (\text{Ec. 17})$$

Siendo el radio hidráulico igual a:

$$R_h = \frac{A_r}{P_m} \quad (\text{Ec. 18})$$

Partiendo de la ecuación anterior entonces se calcula la velocidad de fluido como sigue:

$$v_f = \frac{q_t}{A_f} \quad (\text{Ec. 19})$$

Si el flujo es laminar ($Re < 2000$), el factor de fricción se calcula como:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (\text{Ec. 20})$$

Cuando el flujo es turbulento ($Re > 4000$) el factor de fricción depende no sólo del número de Reynolds, sino también de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería, ε_t/D_i , es decir, la rugosidad de las paredes de la tubería (ε_t) comparada con el diámetro de la tubería (D_i). Como el tipo de superficie interna de la tubería comercial es prácticamente independiente del diámetro, la

rugosidad de las paredes tiene mayor efecto en el factor de fricción para diámetros pequeños. En consecuencia las tuberías de pequeño diámetro se acercan a la condición de gran rugosidad y en general tienen mayores factores de fricción que tuberías del mismo material pero de mayores diámetros. En el Apéndice I se presenta la gráfica mediante la cual se puede obtener el factor de fricción para cualquier tipo de tubería comercial, la zona turbulenta de dicho diagrama se refleja en la siguiente ecuación:

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{1}{3,7(D_i/\epsilon_T)} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^2} \quad (\text{Ec. 21})$$

- (b) Pérdidas menores: ocasionadas por cambios en la dirección del flujo, obstrucciones en el paso del flujo, cambios repentinos o graduales en la superficie y contorno del paso del flujo (Crane, 1988), tales como los producidos por codos, cruces, tes, expansión o contracción de la sección de flujo, válvula, etc., se calculan mediante la siguiente expresión:

$$h_m = k \cdot \frac{v_f^2}{2g} \quad (\text{Ec. 22})$$

De forma análoga, igualando con la ecuación de Darcy, queda que el coeficiente de resistencia es igual a:

$$k = f \cdot \frac{L}{D_i} \quad (\text{Ec. 23})$$

Esto significa que para una línea dada de válvulas o accesorios, k tiende a variar con la relación (L/D) , como sucede con el factor de fricción f , para tuberías rectas y nuevas de acero comercial, debido a que el coeficiente de resistencia es constante para cualquier condición de flujo, el valor de L/D para cualquier válvula o accesorio, debe variar de modo inverso al cambio del factor de fricción para la condición que presenta el flujo. (Crane, 1988).

En el caso de la pérdida en vueltas de tubería, se calcula considerando la Figura N°14 y N°15.

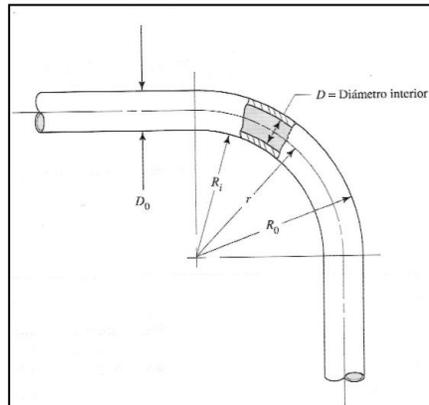


Figura N°14. Vuelta de 90°. (Mott, 2006)

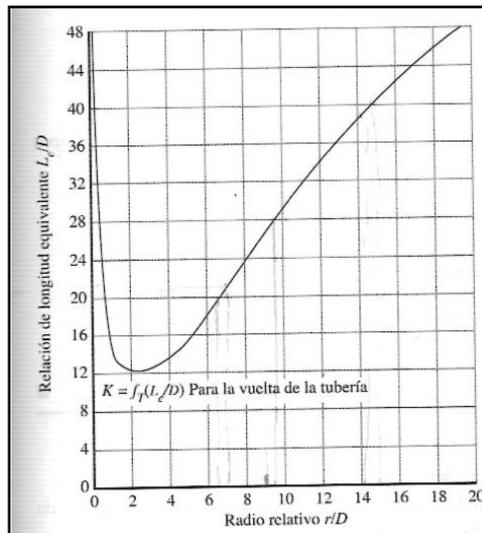


Figura N°15. Resistencia debido a las vueltas de 90°. (Mott, 2006)

La pérdida debida a las curvas de más de 90° es menor que la suma de pérdidas en el número total de curvas de 90° contenidas en la hélice. La pérdida ocasionada por la longitud, en términos de k es igual a la longitud desarrollada de la curva, en diámetros de tubería, multiplicada por el factor de fricción (Crane, 1988).

$$k = 0,5 \cdot f_t \cdot \pi \cdot \frac{r}{D_o} \quad (\text{Ec. 24})$$

En el caso de ensachamientos de tuberías se aplicará la siguiente ecuación:

$$k = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) \quad (\text{Ec. 25})$$

En el caso de estrechamientos bruscos:

$$k = \left(1 - \frac{d_1^2}{d_2^2}\right) \quad (\text{Ec. 26})$$

Luego de estudiar las formas de pérdidas o ganancias de energía en un sistema de flujo, se integrarán dichas expresiones en una sola ecuación, denominada ecuación general de la energía, tomando como base el sistema de flujo mostrado en la Figura N° 16. Los términos E_1' y E_2' denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2 respectivamente.

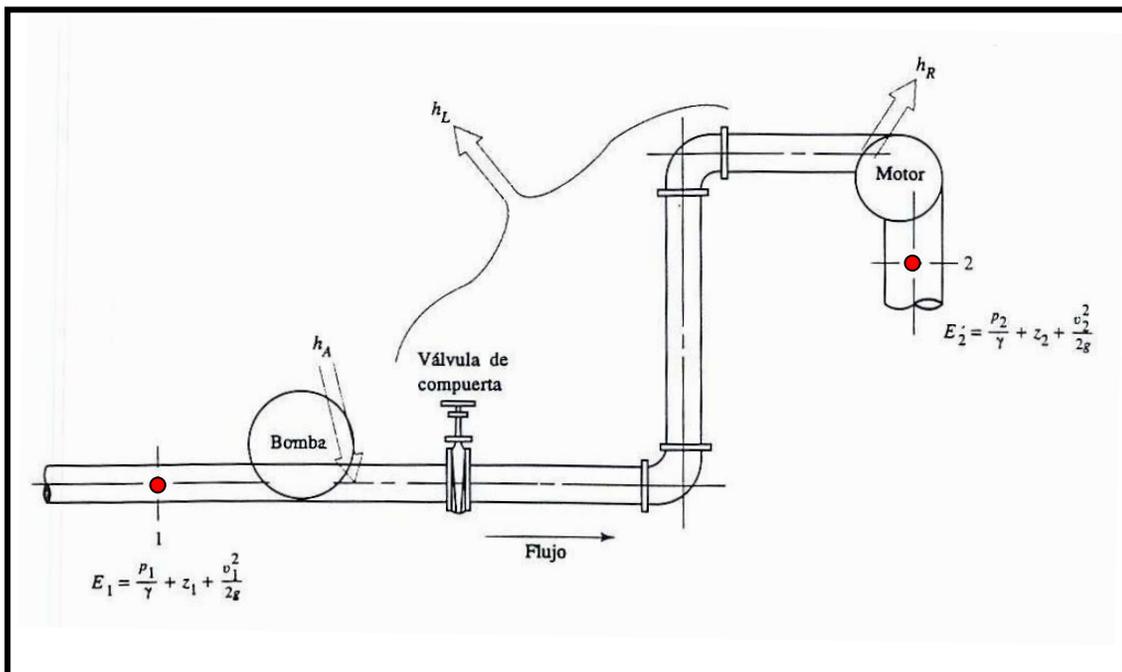


Figura N° 16. Sistema de flujo de fluidos que ilustra la ecuación general de la energía. (Mott, 2006)

Para tal sistema, el principio de conservación de la energía se expresa como:

$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + h_A - h_L - h_R = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (\text{Ec. 27})$$

2.6.5.2. Criterios de diseño de equipos.

Dimensionamiento de tuberías y accesorios: En el sistema o análisis de un sistema de flujo en tuberías existen diversos parámetros básicos involucrados (Mott, 2006):

- (a) Las pérdidas de energía al sistema o la adición de energía al sistema.
- (b) La velocidad de flujo de volumen del fluido o la velocidad del fluido.
- (c) El diámetro de la tubería.
- (d) La longitud de la tubería.
- (e) La rugosidad de la pared de la tubería.
- (f) Las propiedades físicas del fluido como peso específico, densidad y viscosidad.
- (g) El espesor de la tubería, el cual debe ser seleccionada de acuerdo a los requerimientos de presión interna.
- (h) Los codos deben estar ubicados a una altura igual a 10 veces el diámetro de la tubería (Rayner, 2005)

Además, se debe considerar en la línea de descarga y de succión de la bomba, lo siguiente:

- (a) El tubo para la línea de succión nunca debe ser más pequeño que la conexión de entrada sobre la bomba, debe ser algo mayor para reducir la velocidad de flujo y las pérdidas por fricción.
- (b) Si se requiere un reductor en la línea de succión de una bomba de deben ser de tipo excéntrico, para evitar la formación de bolsas de aire.
- (c) La línea de descarga en las bombas debe ser tan corta directa como sea posible para evitar la pérdida de carga, asimismo, debe contener una válvula cerca de la bomba, para que se dé servicio a ésta o se reemplace.
- (d) El objetivo de diseñar una buena línea de succión es evitar la rotación del fluido y la entrada de aire, que el flujo sea uniforme y disminuir las pérdidas por fricción. (Rayner, 2005), esto es de vital importancia en el caso en estudio, debido a que algunos surfactantes pueden generar espuma en el sistema.

Selección de válvulas: Las válvulas en los procesos químicos se pueden clasificar en dos grandes clases, dependiendo de su función primaria (Sinnott, 2005):

Válvulas de cierre, las cuales tiene como propósito cerrar el paso del fluido.

Válvulas de control (manual o automático) utilizadas para regular el paso del fluido. Las válvulas de control tienen orificios que permiten regular el flujo de fluido a través de estos, cuatro características importantes para su uso son la razón de regulación, capacidad, características y la recuperación.

A continuación se describen dichas características:

La relación de regulación es la razón de un máximo de caudales mínimos en los que la válvula puede dar un buen control (Couper, Penney, Fair y Walas, 2005).

La ecuación básica para dimensionar una válvula de control que se utiliza con líquidos es la misma para todos los fabricantes (Smith& Corripio) :

$$C_v = q \cdot \sqrt{\frac{G_f}{\Delta P_v}} \quad (\text{Ec. 28})$$

El dimensionamiento de la válvula se debe hacer de manera tal que, cuando la válvula se abra completamente, el flujo que pase sea mayor que del que se requiere en condiciones normales de operación; usualmente el sobrediseño se expresa como (Smith& Corripio):

$$q_d = 2 \cdot Q \quad (\text{Ec. 29})$$

Las características se refieren a la relación entre la apertura de la válvula y el caudal, y a la caída de presión (Smith y Corripio, 2006).

Si la relación es lineal la capacidad viene dada por la ecuación:

$$C_v = C_{vmáx} \cdot V_p \quad (\text{Ec. 30})$$

En donde V_p es la apertura de la válvula (0-1); C_{vmax} es la capacidad máxima de la válvula, es decir cuando $V_p=1$.

Si la relación es de igual porcentaje:

$$C_v = C_{vmáx} \cdot \alpha^{V_p-1} \quad (\text{Ec. 31})$$

Donde α es la razón de regulación.

Si la relación es quick open, la relación entre el coeficiente de flujo de la válvula y la posición de la válvula viene dada por:

$$C_v = C_{vmáx} \cdot \sqrt{V_p} \quad (\text{Ec. 32})$$

Por último se tiene la recuperación, la cual es una medida del grado de recuperación de presión en la salida de la válvula de baja presión en la vena contracta. Cuando ocurre un “parpadeo” en la vena contracta la presión de recuperación es alta, se produce un colapso de burbujas resultando cavitación y ruido (Couper et. al., 2005).

Como recomendaciones adicionales se tienen (PDVSA, 1994):

- (a) Válvulas para bloqueo deberán ser instaladas en las tuberías de succión y descarga de bombas, compresores u otro equipo que deba ser aislado para efectuarle mantenimiento mientras que otras unidades continúan en operación.
- (b) Los venteos con válvulas y conexiones de drenajes deben ser instalados en todos los equipos que no tengan venteos o drenajes propios. Las conexiones pueden estar ubicadas en el equipo si es práctico; pero preferiblemente deberían ser ubicadas en las tuberías conectadas donde no existan válvulas o bloques entre la conexión de venteo o drenaje y el equipo.

Medidores de presión: los dispositivos para medir presión pueden agruparse de la forma siguiente: barómetros, manómetros absolutos, manómetros, vacuómetros y manómetros diferenciales.

Los *manómetros*, son los dispositivos más ampliamente utilizados para medir presión, la presión admitida en uno de los compartimientos de su cuerpo provocan la deformación de un sensor (tubo, diafragma, fuelle), cuyo movimiento desplaza a una aguja indicadora sobre una escala graduada. En el exterior del sensor prevalece la presión atmosférica, por lo que esta clase de medidor registra presiones relativas. Los manómetros de Bourdon (Figura N°17) son los más comunes, tienen un sensor helicoidal, en espiral o tubo curvo, que al admitir presión en su interior tienden a rectificar su alineamiento y si uno de sus extremos está fijo, el otro experimenta un desplazamiento proporcional a la presión aplicada (Méndez, 2007).

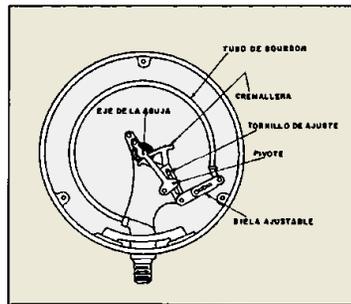


Figura N°17. Manómetro de Bourdon.

Al momento de realizar la instalación de los medidores de presión se debe tener en cuenta algunos detalles, como son (Méndez, 2007):

- (a) La toma de presión debe tener el suficiente diámetro interior para que la medida no se vea afectada por las distintas variaciones en el proceso.
- (b) La tubería, hasta el elemento de medida también debe tener suficiente diámetro para evitar obstrucciones y retardos en la medida.
- (c) Debe existir una válvula de bloqueo cerca de la toma primaria, con el objetivo de aislar el medidor cuando se requiera realizar el mantenimiento (Méndez, 2007).

Medidores de nivel: los medidores de nivel trabajan bien midiendo directamente la altura del líquido sobre un nivel de referencia (cinta y plomada, sonda, nivel de cristal, e instrumentos de flotador), bien la presión hidrostática (manométrico, de membrana, tipo burbujeo, de presión diferencial de diafragma), bien el desplazamiento producido por un flotador por el propio líquido contenido en el tanque del proceso (medidor de desplazamiento a barra de torsión) o bien aprovechando características eléctricas del líquido (resistivo, conductivo, capacitivo, etc.). Se deben seleccionar dependiendo de la temperatura y presión de operación, así como también de acuerdo a la condición del tanque: cerrado o abierto (Creus, 2005).

Bombas reciprocantes: Una bomba reciprocante es de desplazamiento positivo, es decir, recibe un volumen fijo de líquido en condiciones casi de succión, lo comprime a la presión de descarga y lo expulsa por la boquilla de descarga.

Las bombas de desplazamiento positivo funcionan por el movimiento alternativo de un pistón, émbolo o diafragma. Cuando cualquiera de dichos elementos

se retrae el líquido dentro de la cámara de bombeo se expande y se reduce la presión, al alcanzar un valor menor a la presión de succión entonces, la presión diferencial empuja la válvula de succión y la abre, luego el líquido circula por la válvula y sigue al elemento en su carrera de succión, cuando el elemento desacelera, la válvula de succión vuelve a su asiento de forma gradual, y cuando se detiene el elemento, se cierra la válvula. Seguidamente el elemento invierte su movimiento al comprimir el líquido atrapado en la cámara de bombeo, hasta que la presión en la cámara excede la presión de descarga lo suficiente para separar a la válvula de descarga de su asiento.

La bomba reciprocante no es cinética como la centrífuga y no requiere velocidad para producir presión, pues se pueden obtener presiones altas a bajas velocidades. En general, este tipo de bombas tiene aplicaciones como: homogeneización (por ejemplo la leche, para evitar su separación), dosificación, eliminación de agua salada, inyección de agua salada en yacimientos petroleros, carga de aminas como absorbentes, para pastas aguadas abrasivas o sustancias muy viscosas entre otros.

En general, las bombas reciprocantes poseen la desventaja de descargar el flujo a pulsaciones se puede evitar con la selección de velocidades conservadoras, con diseño cuidadoso del sistema de bombeo y con métodos de mantenimiento que conserven la aleación entre el émbolo y el prensaestopas.

En una bomba de potencia, la velocidad del elemento (pistón, émbolo o diafragma) varía más o menos de acuerdo con el seno del ángulo del muñón o codo del cigüeñal. Sería una función senoidal perfecta si la longitud de la biela fuera infinita. Dado que la velocidad del líquido en la tubería es proporcional a la velocidad del émbolo se puede trazar como porcentaje del promedio. La Figura N°18 muestra el comportamiento de la velocidad de flujo en una bomba simplex y dúplex, en el caso de la primera, ocurren usualmente un choque hidráulico motivado acortamiento de la longitud de carrera por un desplazamiento adelantado de la válvula, dicho comportamiento no ocurre en la segunda, pues se reduce el movimiento muerto de las válvulas y no se altera la longitud de la carrera en ninguno de los lados.

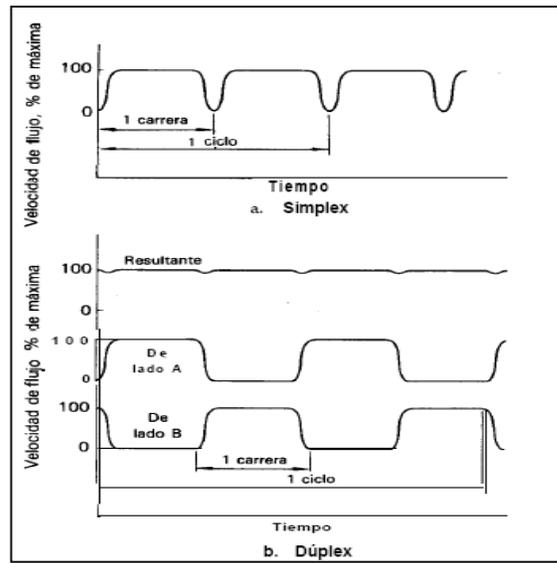


Figura N°18 . Velocidades de flujo en bombas reciprocantes de acción directa de doble acción.
(Kenneth, 1992)

La bomba de potencia tríplex tiene dos codos de cigüeñal desplazados 120° y el traslapo de 60° hace que dos elementos descarguen o succionen líquido en forma simultánea la mitad del tiempo. Por ello, el perfil resultante de velocidad es la suma de las tres ondas senoidales traslapadas, pero deformadas, producen seis impulsos por revolución, debido a las ondas que ocurren durante el traslado de los elementos de bombeo (Figura N°19), en la bomba dúplex no hay traslapo porque los codos están desplazados 180° .

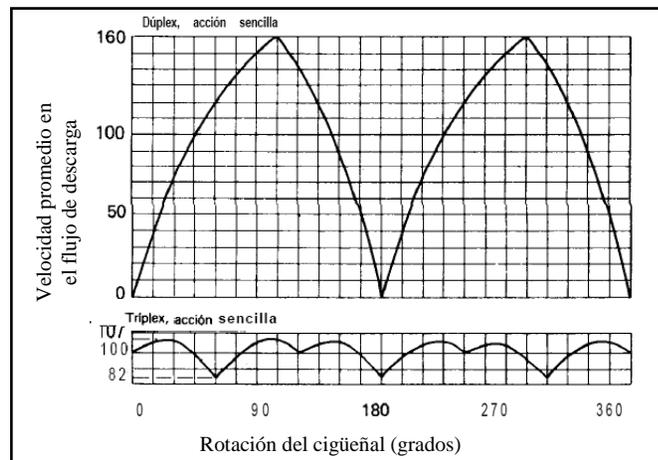


Figura N°19. Curvas de flujo para bombas de potencia reciprocantes

Una bomba símplex, de control manual con accionamiento hidráulico se presenta en la siguiente Figura N°20:

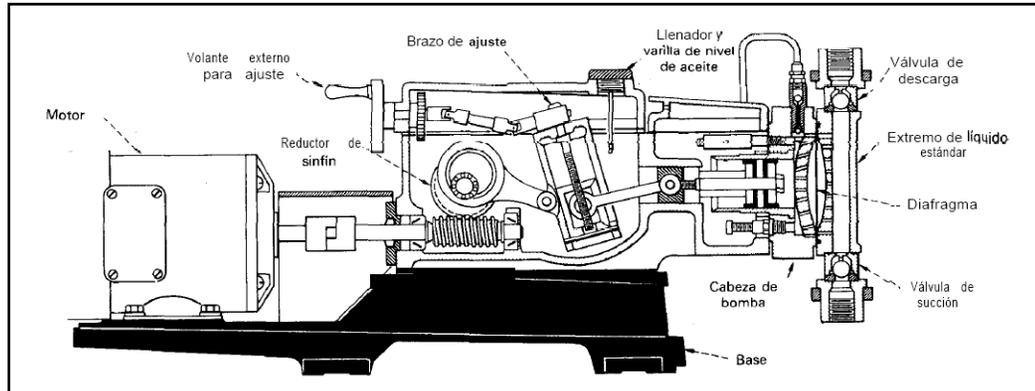


Figura N°20. Bomba de diafragma con acoplamiento hidráulico

Los extremos de líquido, válvulas y mecanismos de carrera son los principales componentes de las bombas de diafragma; en las de accionamiento mecánico, el extremo de líquido incluye el diafragma, cámara de desplazamiento del diafragma, válvulas de retención de succión y descarga y extremo de líquido. En una bomba de diafragma de accionamiento hidráulico, el extremo de líquido incluye uno o más diafragmas, válvulas de retención de succión y descarga, el extremo de líquido y, a veces, un líquido intermedio. En un diafragma de accionamiento hidráulico se producirán efectos más bajos y uniformes que en uno de acoplamiento mecánico.

En la Figura N°21 se muestran las curvas de calibración de las bombas dosificadoras de diafragma, se observa que el cambio en la longitud de carrera, influye en la exactitud de la dosificación y que la curva del sistema no pasa por el cero.

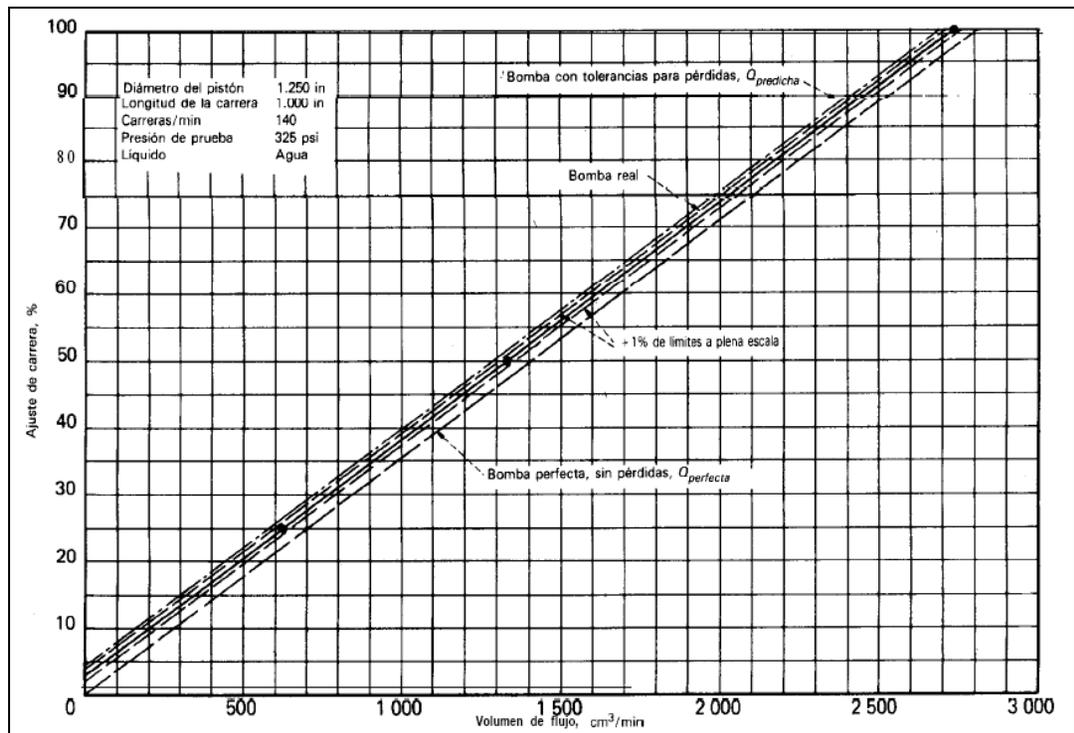


Figura N° 21. Curva de calibración de bomba dosificadora de diafragma (Kenneth, 1992)

La carga neta positiva de succión requerida ($NPSH_R$), se define como la diferencia entre la presión de succión y la presión de vapor, medida en la boquilla de succión con la bomba en marcha. En una bomba recíprocante, se necesita la $NPSH$ para separar la válvula de succión de su asiento y para contrarrestar las pérdidas por fricción y la carga de aceleración en el extremo de líquido (Kenneth, 1992).

La presión requerida para (a) evitar la liberación del aire o gases disueltos en el líquido que se bombea o en el aceite hidráulico y (b) suprimir la cavitación.

- (a) Pérdidas en la presión utilizada para mover cualesquiera diafragmas o el aceite hidráulico.
- (b) Presión requerida para el funcionamiento de la válvula compensadora de vacío, si se utiliza.

El fabricante de las bombas determina, mediante pruebas, la $NPSH_R$, a su capacidad y presión nominales; el usuario no la calcula ni la especifica.

La carga de succión neta positiva disponible ($NPSH_A$) depende de la presión de vapor del fluido que se bombea, las pérdidas de energía en el tubo de succión, la

ubicación del almacenamiento del fluido y la presión que se aplica a este. Si la bomba está abajo del depósito, h_s es positiva, si está arriba, h_s es negativa (Mott, 2006):

$$NPSH_A = P_a - \left(P_v \pm h_s + \sqrt{(h_{f_{m\acute{a}x}}^2 + h_{a_{m\acute{a}x}}^2)} \right) \quad (\text{Ec. 33})$$

El diseñador del sistema de bombeo debe garantizar que la carga de succión neta positiva disponible $NPSH_A$ esté muy por encima de la carga de succión neta positiva requerida $NPSH_R$, con la finalidad de evitar la cavitación. Se considera que el margen mínima entre ambos valores debe ser de 10%, es decir (Mott, 1996):

$$NPSH_A > 1.10NPSH_R \quad (\text{Ec. 34})$$

Dependiendo del tipo de bomba entonces será necesario especificar distintos datos, en general, la presión de succión, presión de descarga, potencia requerida, temperatura de operación, presión máxima de operación, capacidad, propiedades del líquido a bombear tales como la presión de vapor, eficiencia, tipo de material de construcción, curvas de rendimiento, etc.

Asimismo, las bombas de desplazamiento positivo, pueden autocebarse, sacando el vapor desde la línea de succión hacia el sistema de descarga (o a la atmósfera). El hecho de que las bombas de desplazamiento positivo pueden autocebarse, no implica, sin embargo, que tengan requerimientos despreciables de NPSH. Sus requerimientos de NPSH son frecuentemente tan críticos como los de las bombas centrífugas. Con respecto a la ventilación del cuerpo de la bomba rara vez es preocupación del diseñador del servicio, pero ocasionalmente, los venteos deben ser llevados hasta los recipientes de succión, por seguridad, control de emisiones o buenas razones de cuidado (PDVSA, 1997a).

Recipiente contenedor de fase continua/emulsión: las consideraciones a aplicar en el diseño de recipientes a presión son (Couper et. al., 2005):

- (a) La presión de diseño debe ser 10% mayor o 10-15psi mayor a la presión máxima de operación del sistema, se tomará la que resulte mayor entre los dos cálculos mencionados.
- (b) La presión de diseño en recipientes que operan en un intervalo de presión de 0-10 psi y de 600 °F a 1000 °F es de 40 psi.

- (c) El espesor de pared mínimo es de 0,25 plg para 42 plg de diámetro, 0.32 plg para diámetros entre 42-60 plg y 0,38 plg para recipientes con diámetros superiores a 60 plg.
- (d) La tolerancia a la corrosión es de 0,35 cm para condiciones corrosivas y de 0,15 cm para corrientes no corrosivas.
- (e) Se debe considerar la formación de espuma en el recipiente debido a la presencia de surfactantes en el sistema.

CAPÍTULO III MARCO METODOLÓGICO

La conversión del equipo por cargas ubicado en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas de la Universidad Central de Venezuela a un equipo semicontinuo se realizará en cuatro (4) etapas principales (Figura N° 22) a saber:

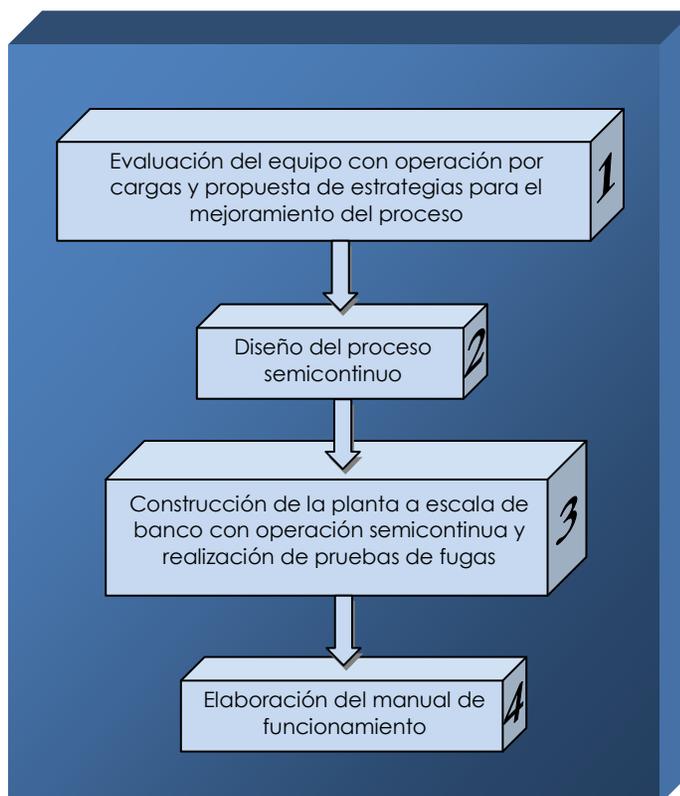


Figura N° 22. Etapas de desarrollo de la propuesta

3.1. EVALUACIÓN DEL EQUIPO POR CARGAS

Los elementos que conforman al equipo por cargas se presentan en el Apéndice II, visualizar sus componentes físicos y verificar el estado de los mismos fueron los primeros pasos ejecutados para evaluar el equipo con operación por cargas.

Posteriormente se presencié la preparación de dos tipos de emulsiones, una de agua en aceite (W/O) y la otra de aceite en agua (W/O), empleando las formulaciones y aplicando el procedimiento detallado empleado por Matos (2009). Se prestó

especial atención en la manipulación de las válvulas y rotámetros de acuerdo al correcto recorrido de fluidos y a las presiones requeridas, así como también en la visualización de todas las fases del proceso, montaje, operación y desmontaje del módulo, velocidad de agitación, y, en general de todas las acciones que pudieron afectar directa o indirectamente las variables críticas del proceso (esfuerzo de corte, diferencia de presión transmembrana, temperatura, etc.).

Luego de evaluar el proceso de preparación de emulsiones por cargas, se describieron mediante un esquema sencillo los aspectos a mejorar en el equipo con operación por cargas, así como también las posibles estrategias para ejecutar dichas mejoras.

Por último, luego de plantear las estrategias de solución de los problemas operativos de la planta y tomando en cuenta el análisis de las variables críticas que son independientes de la escala del proceso, se determinaron cuáles fueron los equipos que dirigen el cambio de escala (de laboratorio a escala de banco), es decir aquellos equipos que si se modifican reflejan directamente el escalamiento del proceso, esta información fue parte importante del desarrollo del posterior diseño de la planta a escala de banco con operación semicontinua.

3.2. DISEÑO DEL PROCESO SEMICONTINUO.

Luego de realizar la evaluación del equipo semicontinuo y determinar los equipos que fundamentan el cambio de escala, se procedió a realizar el diseño de la planta, tomando en cuenta, en primer lugar los equipos que se tienen disponibles y en segundo lugar ejecutando las etapas de diseño definidas, ambos aspectos se definen en las siguientes subsecciones.

3.2.1. Equipos disponibles para la construcción de la planta a escala de banco con operación semicontinua.

Para la construcción de la planta a escala de banco se contó con la disposición de varios equipos:

- (a) Dos (2) bombas tipo diafragma.

- (b) Una (1) bomba tipo pistón.
- (c) Un (1) módulo de membranas, que puede albergar de forma independiente a tres membranas.
- (d) Un (1) recipiente a presión, con chaqueta de calentamiento y válvula de regulación de presión integrada (Filtratest).

Es importante destacar que dichos equipos no fueron diseñados específicamente para la aplicación planteada, por lo que fue necesario realizar una evaluación previa de los mismos de acuerdo a los requerimientos y características del proceso de emulsionar con membranas; entonces, para concluir si era posible utilizar dichos equipos en las condiciones requeridas de operación, se consideraron los siguientes aspectos:

- (a) Con respecto a la elección de las bombas, se tomó en cuenta el tipo de bomba, $NPSH_R$, $NPSH_A$, presión de descarga y temperaturas de operación, caudal nominal de operación, material de fabricación, además se verificó que no altere las propiedades de la emulsión que se va formando.
- (b) Con respecto al módulo, se tiene que en principio fue diseñado para procesos de nanofiltración, su evaluación se basó en la verificación de la caída de presión en el soporte poroso (membrana metálica SIKA R80); del mismo modo se tomó en cuenta la temperatura de diseño y material de fabricación.
- (c) Con respecto al recipiente a presión se consideró el rediseño de la pieza inferior del mismo, el cual conectaría a dicho recipiente con el módulo de membranas.
- (d) Para la válvula reguladora se verificó la temperatura y presión máxima de operación. Estos dos últimos equipos forman parte del Filtratest.

3.2.2. Ejecución de las etapas de diseño

Luego de verificar la factibilidad del uso de los equipos disponibles según los requerimientos del proceso, se ejecutaron las fases de diseño de la planta a escala de banco con operación semi continua definidas en el Capítulo II del presente Trabajo Especial de Grado y en correspondencia con los objetivos establecidos se cumplieron las siguientes etapas.

- (a) En la fase de visualización se realizó un enfoque general de la distribución espacial de la planta, así como su funcionamiento y posibles estrategias de diseño y construcción.
- (b) En la ingeniería conceptual se definieron las bases del estudio (preliminares), descripción de las instalaciones, capacidad de la planta, definición de procesos y servicios, filosofía de diseño, seguridad y protección, códigos y normas aplicables, criterios especiales de diseño, diagrama de bloques, diagrama de flujo de procesos (preliminar).
- (c) En la ingeniería básica se definieron las bases y criterios de diseño y se generaron los siguientes documentos: plano de implantación de equipos (plot plan), plano de rutas de tuberías, diagramas de tuberías e instrumentación (DTI's), listas de equipos, tuberías y materiales, memorias de cálculo, lista de instrumentos/válvulas, diagramas de simbología y estimado para presupuesto.
- (d) De la ingeniería de detalle: hojas de especificaciones de equipos, diagrama de flujo de proceso (DFP), diagrama de tuberías e instrumentación (DTI's), cotizaciones de equipos.
- (e) Por último, se procedió a la adquisición de los equipos faltantes y construcción de la planta a escala de banco.

3.2.3. Construcción de la planta y realización de pruebas de fugas

El proceso de construcción de la planta se ejecutó tomando en cuenta los documentos generados en la fase de diseño; del mismo modo se consideraron los procedimientos correctos de instalación de accesorios, válvulas y tuberías, teniendo en cuenta los criterios de diseño, recomendaciones de fabricantes y personas expertas en el montaje de este tipo de sistemas.

3.2.4. Elaboración del manual de funcionamiento del equipo

Seguidamente se procedió a la realización del manual de operaciones, en el cual se indica paso a paso y de forma detallada las instrucciones para la operación del

proceso, es decir, los pasos a seguir para preparar emulsiones en la planta, desde el arranque, operación, hasta la parada.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se exponen en forma detallada los resultados obtenidos luego de ejecutar la metodología planteada en el presente Trabajo Especial de Grado.

4.1. EVALUACIÓN DEL EQUIPO POR CARGAS

4.1.1. Inspección e identificación de problemas en la operación del equipo por cargas

Durante la observación del proceso de producción de emulsiones mediante la técnica de “emulsionar con membranas” se empleó el FILTRATEST, equipo mostrado en la Figura N°23 (equipo que inicialmente no estaba destinado para tal fin, pero que posteriormente fue modificado de acuerdo a la nueva necesidad); a continuación se detallan los aspectos tanto mecánicos o estructurales, como de operación apreciados durante la observación del proceso de emulsionar con membranas en el equipo por cargas.

Con respecto al estado físico de las válvulas, tuberías, conexiones, manómetros, rotámetros y recipiente a presión del Filtratest, se encuentran en buen estado y funcionan correctamente.

- (a) El soporte del módulo de la membrana está en buenas condiciones. Con respecto a su efectividad durante la operación presenta diversos inconvenientes ocasionados por su geometría:
 - Debido a la presión de la fase a dispersar aplicada, la membrana se deforma en cada orificio del soporte, lo cual hace que el esfuerzo de corte no sea uniforme a lo largo de la superficie de la membrana, la cual puede ser una de las causas que originan en algunos casos polidispersidad en las emulsiones producidas, como ocurrió en algunas emulsiones realizadas por Matos (2009). Además, se pueden producir fisuras en la membrana, justo en la frontera membrana-soporte

- Se desaprovecha el 84,19% de la superficie activa, ya que el área de la membrana es de $1,73 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$ y el total del área efectiva de la misma es de $3,08 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ (Figura N°23).

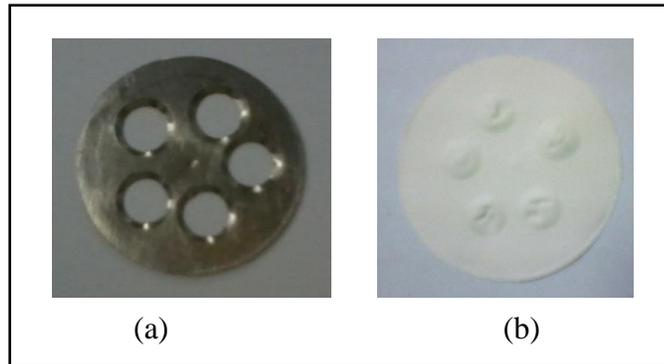


Figura N°23. (a) Soporte (b) Pandeo de la membrana.

- (b) Para realizar la agitación se emplea un agitador magnético (Figura N°24) y una barra metálica recubierta la cual se ubica en el fondo del recipiente para generar la agitación al encender el equipo; dicho equipo funciona correctamente, sin embargo, la agitación uniforme requerida para producir emulsiones monodispersas se puede obtener, pues la velocidad de agitación en la fase continua varía de una sección a otra del beaker, quedando espacios de “volumen muerto” (con menos o ninguna agitación que en otros).



Figura N°24 Agitador Magnético Corning PC 353

- (c) Con respecto a la operación, justo cuando se pone en contacto la fase continua (contenida en un beaker) con la celda, se forma una burbuja en la superficie de la membrana, la cual se debe retirar para poder iniciar la operación pues impide el contacto directo entre dicha fase y la membrana. Para eliminar la burbuja se

inicia la agitación y se pone en contacto la barra metálica con el aire atrapado (esto se hace elevando el recipiente, ya que la barra se encuentra en el fondo del mismo), el cual va saliendo progresivamente al mantenerse allí la agitación. Este procedimiento, reduce la efectividad en la operación y prolonga el tiempo de la misma.

- (d) Debido a que la válvula reguladora del Filtratec está ajustada para operar a 1,5 bar, y al hecho de que a altas presiones las membranas se rompen, se puede aseverar que no se tiene un amplio intervalo de diferencia de presión transmembrana.
- (e) El proceso de producción puede llevar varias horas (de 5 h a 9 h) para producir 100 g de emulsión, como fue el caso de los experimentos realizados por Hidalgo (2009) y Matos (2009).
- (f) Debido a los largos tiempos de producción, la formulación de la emulsión puede variar por la evaporación de alguno de sus componentes, como es el caso de alcoholes (pentanol o secbutanol, entre otros) que podrían ser incluidos en la formulación; por consiguiente variarán las propiedades deseadas de la emulsión tales como la viscosidad y estabilidad.
- (g) El beaker contenedor de la emulsión/fase continua, se encuentra expuesto al ambiente, lo cual favorece la contaminación de la emulsión.

4.1.2. Estrategias para el mejoramiento del proceso

Considerando lo descrito en la sección anterior y analizando cada uno de los problemas de operación, se realizó la tabla N°2, la cual incluye la variable de proceso involucrada, el problema observado y la estrategia de solución planteada.

Tabla N°2. Esquema de evaluación del equipo por cargas.

Variable de proceso	Problema observado	Estrategia
Esfuerzo de corte	Geometría del soporte de la membrana, pandea la membrana.	- Soportar la membrana de manera tal que no se deforme.
	Formación de burbuja en la superficie de la membrana, lado fase continua.	- Habilitar un mejor sistema para dejar que el aire salga con facilidad.
	Agitación no uniforme (tipo de agitador empleado)	- Generar el esfuerzo de corte a través de flujo cruzado empleando una bomba.
Presión en la fase continua	La presión en la fase continua es presión atmosférica.	- Generar flujo cruzado y aplicar un incremento en la presión del lado de la fase continua (sin superar la presión de la fase a dispersar) mediante la adición de una bomba de recirculación.
Temperatura	Ausencia de equipo de calentamiento integrado.	-Emplear chaquetas de calentamiento en los recipientes contenedor de las fases de interés.
Tiempo de operación	- Prolongados tiempos de operación, en consecuencia: (a) Poco volumen de producción: $2,03 \cdot 10^{-5}$ y $1,35 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, según Matos (2009) (b) Variación de la formulación por la evaporación de los componentes.	- Incrementar el área efectiva de la membrana, cambiando el soporte de la misma.

4.2. DISEÑO DEL PROCESO SEMICONTINUO

A continuación se presenta la secuencia del proceso de diseño ejecutado de acuerdo a las fases de diseño que se ajustan a las necesidades del presente Trabajo Especial de Grado definidas en la sección 3.2.

4.2.1. Visualización

Inicialmente se definieron aspectos que serían el punto de partida para la realización exitosa del diseño de la planta:

- (a) La planta debe ser versátil, en la que puedan emplearse distintos tipos de membranas y formulaciones, intervalos de diferencia de presión transmembrana

y temperatura amplios, además de caudales de operación variados que permitan la obtención de variados esfuerzos de corte.

- (b) Se operará a flujo cruzado y de forma semicontinua.
- (c) La bomba a utilizar debe ser de desplazamiento positivo, para así conservar las propiedades de la emulsión producida.
- (d) Incluir ciclos de limpieza para evitar obstrucciones en el sistema y obtener productos de alta pureza.
- (e) El módulo a utilizar debe evitar el pandeo de la membrana durante la operación.
- (f) Se debe garantizar el control de la diferencia de presión transmembrana en el sistema, para obtener el tamaño de gota deseado, independientemente de la formulación elegida.
- (g) Todas las válvulas de paso y válvulas de equipos deben ser de fácil acceso, es decir, que al manipularlas el operario no se tope con tuberías, equipos u otras válvulas.
- (h) La planta debe ser segura para sus operarios y para todo el personal que labore en el Laboratorio de Separaciones de Mecánicas (Módulo V).

4.2.2. Bases del estudio

4.2.2.1. Selección del sitio y parámetros de ubicación de la planta:

La planta se ubicó en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Módulo V, de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela, en la Ciudad Universitaria de Caracas, tomando en cuenta los siguientes criterios:

- (a) En dicho laboratorio se encuentran centralizados los equipos que hacen posible estudiar el comportamiento reológico y distribución de tamaño de gotas de las emulsiones.
- (b) Acceso a tomas de electricidad, de tal forma que se puedan conectar las bombas con facilidad.
- (c) Suficiente espacio disponible para colocar los equipos, considerando el tamaño del Filtratec, bombas de recirculación, cilindro de nitrógeno y módulo de membranas.

- (d) Fácil acceso al cilindro de nitrógeno, de acuerdo a la entrada que le corresponde en el Filtratest.
- (e) Suficiente espacio disponible para que el usuario pueda operar la planta con comodidad, alrededor de las bombas de recirculación, módulo de membranas, filtratest y válvulas en general.
- (f) Las medidas del espacio disponible son 60cm de ancho x 227 cm de largo.
- (g) La temperatura del laboratorio es de 25°C.

4.2.2.2. Servicios y suministros requeridos

Como servicio, se requiere energía eléctrica para el funcionamiento de las bombas (110V) y agua para el lavado tanto de la planta como del material de vidrio utilizado para hacer la formulación de la emulsión, agua desmineralizada. Como suministro o insumo se requiere de nitrógeno, gas encargado de presurizar la fase a dispersar en el Filtratest, además de la solución limpiadora para cada ciclo, aditivos, cosurfactantes y las membranas requeridas para cada estudio.

4.2.2.3. Características y condiciones de la materia prima

Como se ha dicho previamente, en la producción de emulsiones están involucradas tres sustancias principales: la fase acuosa, la fase oleosa y el emulsionante. Usualmente se tendrá un 25%p/p de fase a dispersar y un 75% de fase continua. A continuación se presenta una lista de las posibles sustancias a utilizar, ya que son las que se encuentran disponibles para la línea de investigación “Emulsiones con membranas”: agua destilada, queroseno, cloruro de sodio, N-pentanol, 1-butanol, dodecil sulfato de sodio (SDS), polisorbato 80 (Tween 80), polisorbato 20 (Tween 20) y nonilfenoles etoxilados (con grados de etoxilación 4, 6,10 y 15).

Las propiedades físicas de los emulsionantes de los cuales se dispone y los componentes principales de las posibles emulsiones a preparar se presentan en el Apéndice III.

4.2.2.4.Requerimientos de almacén

En la tabla N°3 se presentan los requerimientos de almacén de las sustancias comúnmente empleadas en el Laboratorio de Separaciones Mecánicas, Módulo V, para preparar emulsiones.

Tabla N° 3. Requerimientos de almacén de las sustancias de interés.

Sustancia	Condiciones de almacén
Queroseno	En lugar fresco, separado de oxidantes fuertes. A prueba de incendios. Debe ser envasado en un recipiente hermético e irrompible.
Dodecil sulfato de sodio (SDS)	En lugar fresco y seco, en un recipiente bien cerrado. Proteger contra daño físico. Los envases de este material pueden ser peligrosos cuando están vacíos ya que retienen residuos del producto (polvo, sólidos).
Monooleato de sorbitan (Span 80)	Guardar en recipiente bien cerrado, en lugar fresco y seco, bien ventilado y lejos de sustancias incompatibles (agentes oxidantes fuertes y ácidos fuertes)
Nonifenol etoxilado	Evitar daño físico a los recipientes, almacene en un área seca y bien ventilada, lejos de fuentes de ignición y oxidantes.

4.2.2.5.Manejo y Disposición de Efluentes

Se debe tener en cuenta la disposición final de los efluentes (productos, subproductos y desechos), es importante controlar los olores almacenando en recipientes herméticos las emulsiones producidas y prevenir la contaminación del agua al no verter al desagüe las mismas.

Con el fin de darle un destino adecuado a las emulsiones y una posible reutilización de la materia prima utilizada, se propone centrifugar las emulsiones producidas y separar mediante decantación la fase oleosa de la fase acuosa. Sin embargo, es importante destacar, que dependiendo de la formulación de la emulsión, se debe realizar un estudio para definir su disposición final.

Luego de realizar dicho estudio se puede contactar a la Autoridad Nacional Ambiental constancia mediante la cual se verifique el cumplimiento de la normativa ambiental en general, según el artículo 94 de la Ley Orgánica del Ambiente.

4.2.2.6. Normas y códigos aplicables

- (a) La norma ISA (Instrument Society of America), fue considerada en la diagramación de las tuberías e instrumentación, así como también el manual de Ingeniería de Diseño de PDVSA, normativa asociada a la elaboración de los diagramas de proceso e identificación y numeración de equipos y tuberías de las plantas petroquímicas.
- (b) Para el dimensionamiento de tuberías se tomó como base el manual de dimensionamiento de Tuberías de PDVSA.
- (c) Norma API-650. Tanques de almacenamiento atmosférico.
- (d) La ley Orgánica del Ambiente, la Ley penal del Ambiente y Ley Sobre Sustancias, Materiales y Desechos Peligrosos se consideró para el manejo de efluentes.
- (e) LOPCYMAT. Ley Orgánica de Prevención, Condiciones y Medio Ambiente de Trabajo.

4.2.2.7. Seguridad y protección:

En el Artículo 13 de la Ley sobre Sustancias, Materiales y Desechos peligrosos, indican que las personas deben utilizar dichas sustancias de manera segura para evitar daños a la salud y al ambiente. La seguridad y protección, tanto del operario como de los equipos son de suma importancia en el desempeño posterior de la planta, con respecto al primero, los riesgos que presenta la planta son el calentamiento de las bombas de recirculación, la sobrepresión en las tuberías si no se manipulan de forma adecuada las válvulas y los riesgos que conlleva trabajar con sustancias tóxicas de acuerdo a las formulaciones utilizadas, para evitar accidentes, el operario debe utilizar los equipos de protección adecuados (lentes, máscaras, guantes, bata, etc.), conocer muy bien el proceso y cómo debe manipular cada válvula dependiendo del ciclo de operación que se esté ejecutando.

Con respecto al cuidado de los equipos, la bomba tiene integrado un guardamotor, el cual protege el motor de cualquier esfuerzo adicional que deba realizar causado por ejemplo por obstrucciones aguas abajo, asimismo, para evitar el

regreso del fluido a la descarga de la bomba se ha dispuesto una válvula check en la descarga de la misma. De igual forma, se realizarán ciclos de limpieza luego de preparar alguna emulsión, para evitar obstrucciones en el sistema.

La protección del operario, equipos e instalaciones de trabajo, son una exigencia de la LOPCYMAT, en varios de sus artículos, en el artículo 54 de los deberes de los trabajadores y las trabajadoras y 55 de los derechos de empleadores y empleadoras, entre otros. Deben utilizar bata de laboratorio, lentes, máscara de gases, guantes y protección auditiva si la bomba produce ruido.

4.2.2.8. Capacidad de la planta

Para calcular la capacidad de la planta se consideró en primer lugar la capacidad del recipiente contenedor de fase a dispersar disponible (0,4 L).

Tomando como fase a dispersar agua, se calculó la masa que ocupa en dicho volumen (0,4 L), y resultó igual a 0,4 Kg, seguidamente se realizó el mismo cálculo cuando la fase a dispersar es queroseno (con densidad 800Kg/m^3) la masa obtenida es de 0,32Kg.

Usualmente la cantidad máxima de fase dispersa en una emulsión es de 25%.

En la Tabla N°4 se muestra la cantidad total de emulsión en cada caso, los valores corresponden a los volúmenes mínimos ocupados.

Tabla N°4. Volumen de emulsiones con 25% p/p de fase dispersa

Tipo de emulsión	Cantidad de fase dispersa (Kg)	Cantidad de emulsión obtenida (Kg)	Volumen total que ocupa la emulsión producida (L)
O/W	0,32	1,28	1,36
W/O	0,40	1,60	1,90

De forma análoga se realizaron los cálculos, pero esta vez para producir emulsiones con un contenido de 1% p/p de fase dispersa, con la cual se obtuvieron los posibles volúmenes máximos de emulsión. En la tabla N°5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla N°5. Volumen de emulsiones con 1% m/m de fase dispersa

Tipo de emulsión	Cantidad de fase dispersa (Kg)	Cantidad de emulsión obtenida (Kg)	Volumen total que ocupa la emulsión producida (L)
O/W	0,32	32	32
W/O	0,40	40	49,9

El volumen máximo obtenido es 49,9 L, el cual es notablemente superior al rango de capacidades permitido para plantas a escala de banco (5-22 L) (Ver Figura N°4), además un tanque con dicha capacidad ocupa una cantidad considerable del espacio disponible para la planta.

Otro aspecto a considerar en la definición de la capacidad de la planta es el gasto de materia prima, servicios e insumos, pues se requeriría una gran cantidad de recursos económicos para mantenerla en funcionamiento, sin embargo se debe tener cuidado de que la capacidad definida sea la suficiente para poder llevar a cabo varios tipos de estudios, tales como los presentados en la sección de Antecedentes del presente Trabajo Especial de Grado y que incluyen capacidades de 2 L y 10 L.

Considerando lo expuesto anteriormente, la capacidad de la planta es de 8,0 L.

4.2.3. Descripción del Proceso

En la planta, se podrán obtener tres productos: emulsiones simples, emulsiones simples concentradas y emulsiones dobles, para cada uno se desarrollarán tres procesos distintos, adicional a estos ciclos se tiene el ciclo de limpieza del equipo. A continuación se presenta en la Figura N°25 un esquema que servirá para entender con mayor facilidad las descripciones de cada ciclo.

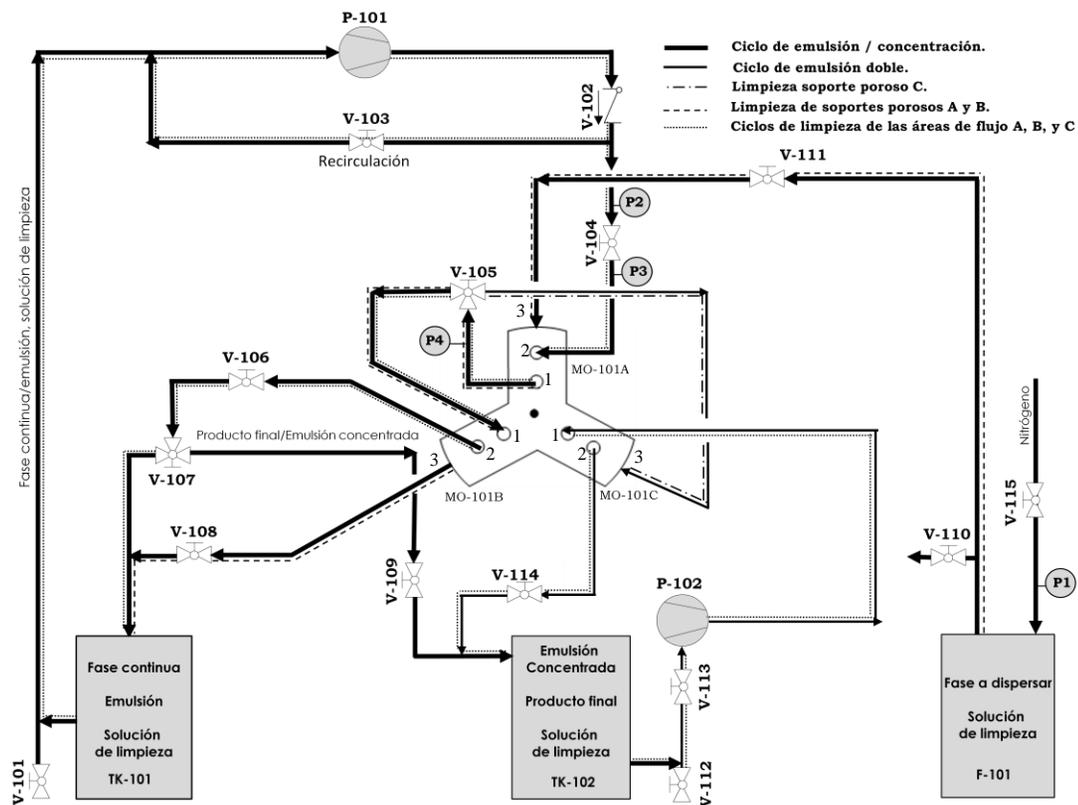


Figura N°25 . Esquema de proceso

Luego de definir el tipo de emulsión (O/W, W/O, W/O/W, O/W/O), la formulación y seleccionar la(s) membrana(s), así como también las condiciones de proceso. Se debe mezclar cada fase con el surfactante y/o aditivo seleccionado y posteriormente almacenarlas en los tanques adecuados dependiendo del tipo de emulsión. Seguidamente se inicia el proceso que corresponda a la emulsión deseada:

- (a) Producción de emulsión simple: la fase continua almacenada en TK-101 es bombeada por medio de la bomba P-101 a través de la sección del módulo que contiene a la membrana (MO-101A), y fluye paralelamente su superficie para separar y recolectar las gotas de fase discontinua que se forman al presurizar dicha fase a través de los poros de la membrana, la fase discontinua se encuentra almacenada en F-101. La emulsión que se va formando queda almacenada en TK-101 para su recirculación. El proceso finaliza cuando se alcanza el porcentaje de fase dispersa deseado.

- (b) Producción de emulsión concentrada: en caso de que no convenga hacer recircular por cierto período de tiempo la emulsión a través de la membrana, se debe implementar este ciclo. Para producir emulsiones simples concentradas se lleva a cabo un proceso análogo al descrito para emulsiones simples, sólo que la emulsión que se va formando en la sección del módulo M-101-A, se hace pasar a de forma paralela a la superficie de la membrana, en el cual se encuentra una membrana que permitirá el paso transversal de la fase continua y del otro lado de la membrana quedará la emulsión simple concentrada que seguidamente se va almacenando en el tanque TK-102 y la emulsión diluida regresa a TK-101 para ser nuevamente bombeada. El producto final queda almacenado en TK-102, el proceso finaliza cuando se alcanza el porcentaje de fase dispersa deseado.
- (c) Producción de emulsión doble: el proceso de producción de emulsiones dobles se lleva a cabo de forma análoga al proceso de producción de emulsiones simples, la variación ocurre justo cuando la emulsión formada en la sección M-101A del módulo se hace pasar (por medio de la entrada lateral de la sección MO-101C) transversalmente a la superficie de una segunda membrana contenida en la sección MO-101C del módulo. La fase más externa de la emulsión doble contenida en TK-102 fluirá paralelamente a la superficie de dicha membrana por medio de la impulsión de la bomba P-102, arrastrando así las gotas de la emulsión simple obtenida inicialmente.
- (d) Limpieza de soportes porosos MO-101A y MO-101B: la solución limpiadora almacenada en F-101 se presuriza y pasa a través de los soportes porosos tanto de MO-101A como de MO-101B llegando hasta TK-101.
- (e) Ciclos de limpieza de las áreas de flujo de las secciones MO-101A, MO-101B: se llevan a cabo de forma análoga al ciclo de emulsión concentrada, pero en este caso utilizando como fluido de proceso la solución limpiadora.
- (f) Ciclos de limpieza del área de flujo y soporte poroso de MO-101C: se pueden realizar de forma simultánea y se ejecutan de igual forma que el ciclo de producción de emulsión doble.

4.2.4. Filosofía de control.

En la planta se deben controlar distintas variables, a saber: presión de fase a dispersar, presión de la fase continua, nivel en los tanques de almacenamiento, flujo de fase continua. Para realizar dicho control, se eligieron bombas de desplazamiento positivo. Este tipo de bombas controlan sus ciclos de trabajo con válvulas de aspiración y descarga autoaccionadas, las cuales funcionan por diferencia de presión entre el exterior y el interior de la bomba. Además, para el control de flujo de descarga de la bomba (flujo de fase continua), también se aplicó lo siguiente:

- (a) Control de longitud de carrera: el cual se logra manipulando la perilla que posee la bomba.
- (b) Control mediante derivación de caudal: se logró mediante un reciclo proveniente de un punto de separación en la línea de succión de la bomba (el control de válvula de regulación de flujo es manual).

Adicionalmente, en el caso de la bomba de engranajes, posee una válvula de seguridad en la descarga por si se genera una sobrepresión en la línea de descarga. Cabe destacar que no se dispone de medidores de flujo en la línea de descarga de las bombas.

Para el control de la presión de la fase continua y de la fase a dispersar, se colocaron válvulas reguladoras de presión en la línea de entrada a MO-101A y en la entrada lateral de MO-101C, respectivamente. Ambas válvulas son de control manual. Además se dispone de medidores de presión en la línea de entrada y salida de la fase continua a MO-101A, con los cuales se puede verificar que exista la presión transmembrana requerida para el proceso.

Para los tanques, es necesario controlar el nivel, en el caso de un posible rebose, ambos tanques poseen válvulas de drenaje, sin embargo, para el caso contrario no se tienen indicadores de nivel ni alarmas que indiquen la variación crítica del mismo, sin embargo, siendo éste un sistema en el cual durante la operación más sencilla se estará recirculando cierta cantidad de fluido, es decir, la cantidad de fluido

que se va agregando se conoce, se pueden tomar las medidas pertinentes para asegurarse de que no se presente rebose en el tanque TK-101

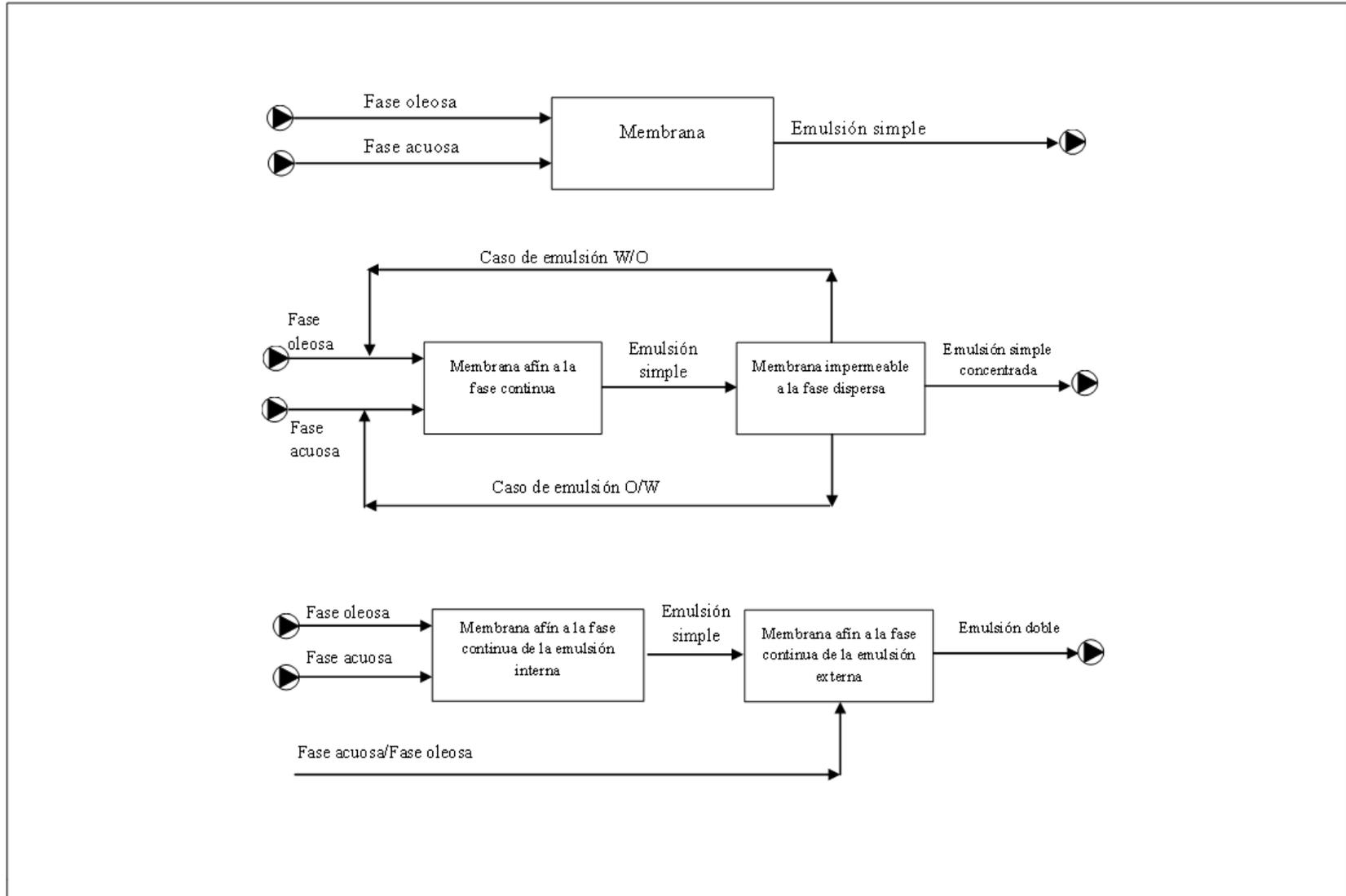
4.2.5. Diagramas generados.

Seguidamente se presenta una secuencia de planos contentivos de los diagramas de proceso. A saber:

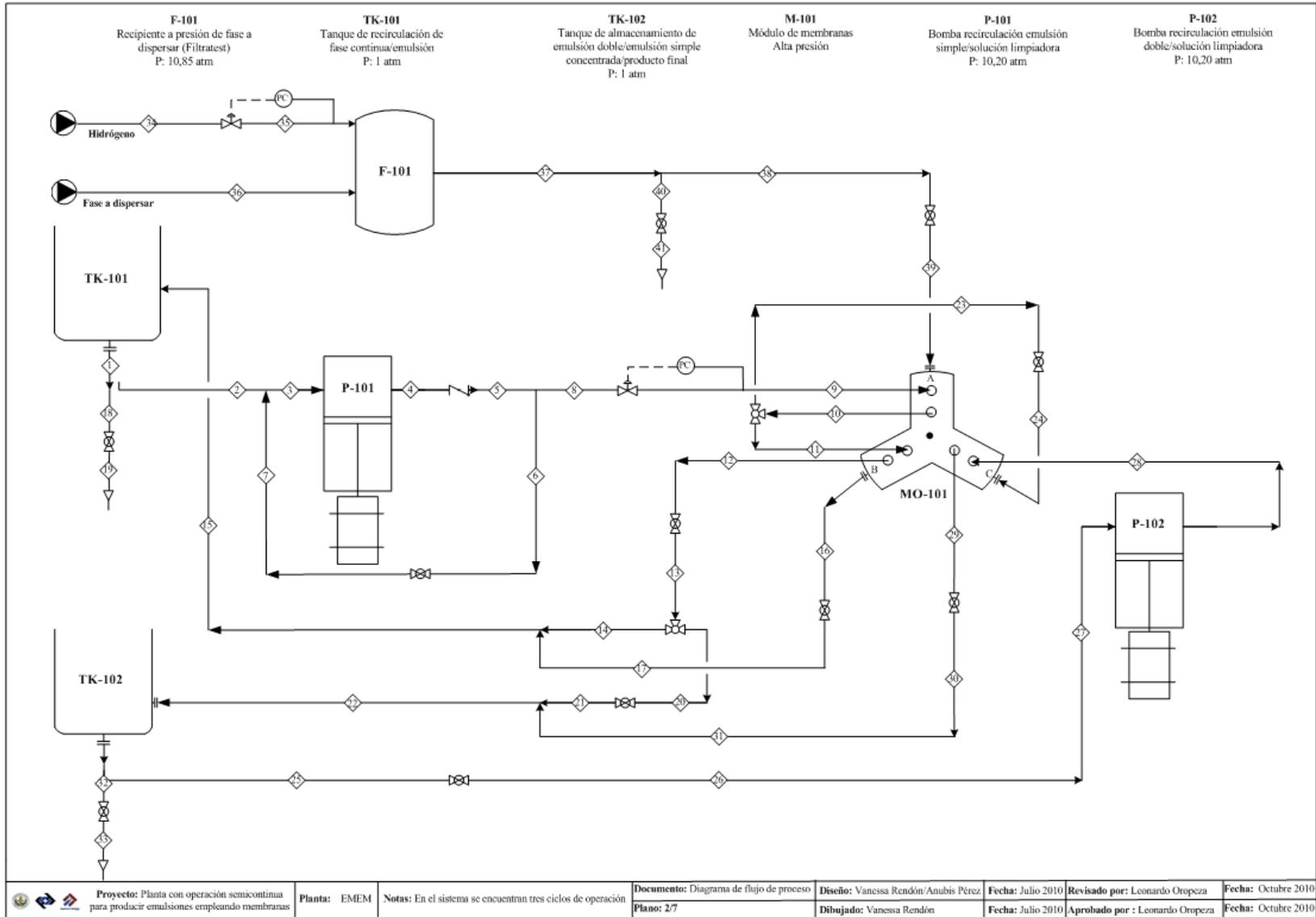
- (a) En el plano 1/7 se presentan tres (3) diagramas de bloques de proceso (DBP), correspondientes a los tres (3) ciclos de producción de la planta: ciclo de emulsión simple, ciclo de emulsión doble, ciclo de emulsión concentrada, los cuales permiten un entendimiento básico del proceso.
- (b) Diagrama de flujo de proceso (DFP): presentado en el plano 2/7, diagrama que incluye los equipos de proceso, condiciones de presión de cada uno, el recorrido de los fluidos desde un equipo a otro, además de una representación básica de los procesos de regulación y control.
- (c) Diagrama de tuberías e instrumentación (DTI), presentado en el plano 3/7 es mucho más específico que los anteriores, en éste se indica el diámetro y longitud de cada tubing, dimensiones de los reductores, los tipos de válvulas e instrumentos se diferencian claramente, y se colocan detalles de los equipos.

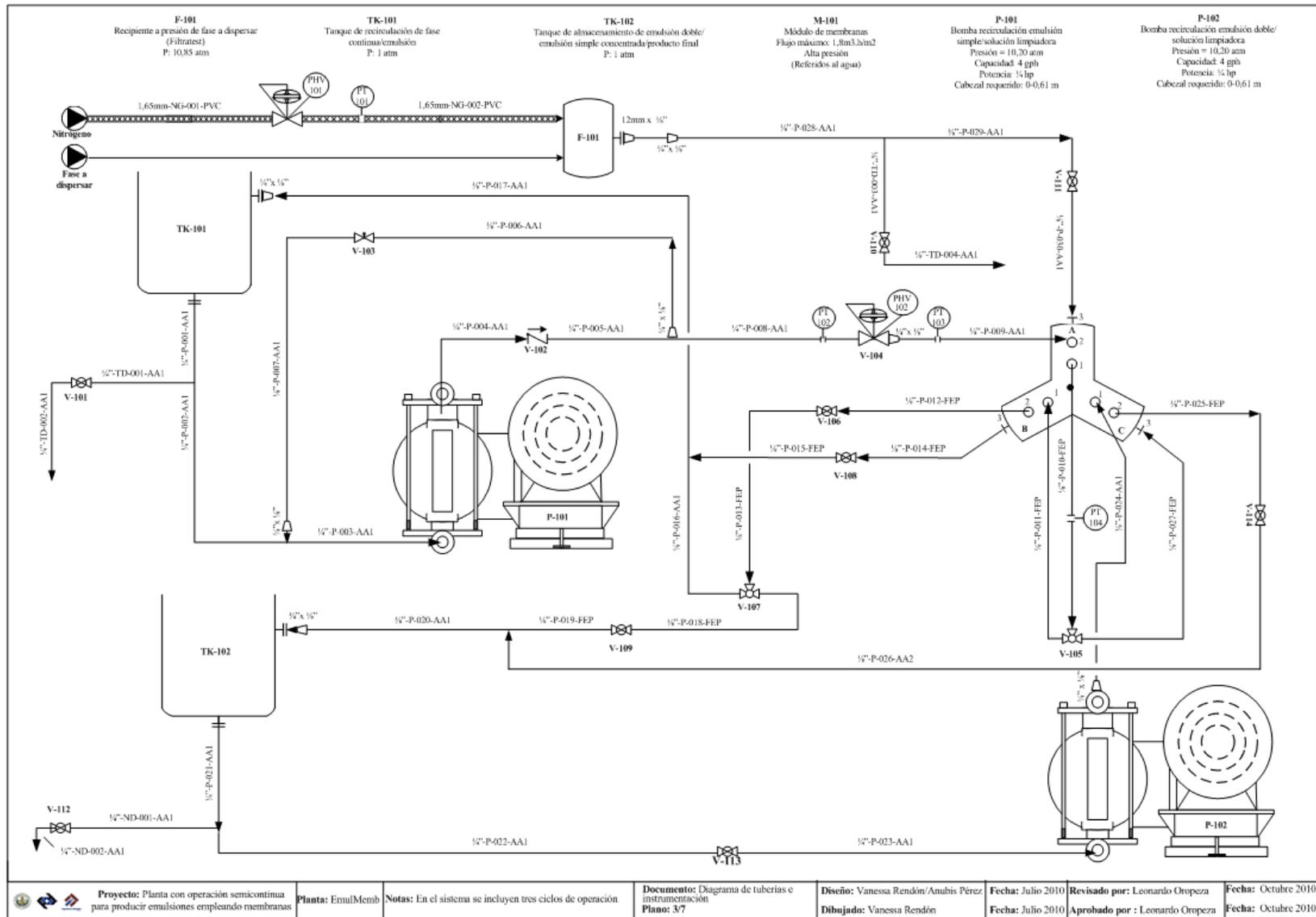
Es importante destacar los diagramas (DFP y el DTI) se fueron actualizado conforme se avanzaba la ejecución de las fases del diseño.

La simbología utilizada en cada diagrama se detalla en el Apéndice IV



	Proyecto: Planta con operación semicontinua para producir emulsiones empleando membranas	Planta: EmulMemb	Notas: a) Ciclo de emulsión simple (b) Ciclo de emulsión concentrada (c) Ciclo de emulsión doble	Documento: Diagrama de bloques de proceso Plano: 1/7	Diseño: Vanessa Rendón/Anubis Pérez Dibujado: Vanessa Rendón	Fecha: Julio 2010	Revisado por: Leonardo Oropeza Aprobado por: Leonardo Oropeza	Fecha: Octubre 2010 Fecha: Octubre 2010
--	---	-------------------------	---	---	---	--------------------------	--	--





.4.2.6. Costos.

En base a la información suministrada por el diagrama de flujo de proceso y del diagrama de tuberías e instrumentación, se definieron cuáles eran los equipos requeridos, las válvulas, el diámetro de las tuberías, así como los medidores de presión necesarios para llevar a cabo el diseño. Debido a los altos precios que se encuentran en Venezuela y en el mundo, y aunado a la dificultad que implica conseguir mayor cantidad de recursos para el proyecto, además de los tiempos de espera de equipos, se inició la búsqueda de opciones para obtener la bomba y el módulo, y simultáneamente se pidieron cotizaciones a distintas empresas.

En la Tabla N°6 se presenta el precio de cada accesorio, instrumento, tubería y equipo, precios obtenidos de acuerdo a las cotizaciones recibidas, dos de las cuales se muestran en el Apéndice V:

Tabla N°6. Costos.

Cantidad	Descripción	Costo por unidad (Bs.)	Costo sin impuesto (Bs.)	Costo más impuesto (Bs.)
2	Válvulas de bola (2 vías) 1/4	610,2	1220,40	1366,848
1	Válvula antirretorno	462,5	462,50	518
8	Válvula de bola (2 vías)	630,8	5046,40	5651,968
2	Válvula de bola (3 vías)	745,2	1490,40	1669,248
4	Te	179,5	718,00	804,16
6	Reductor	73,5	441,00	493,92
3	Te	194,4	583,20	653,184
4	Conector hembra	92,9	371,60	416,192
1	Conector macho	67	67,00	75,04
1	Conector macho	57,5	57,50	64,4
1	Te corrida	240,9	240,90	269,808
2	Anillo	75	150,00	168
1	Unión	194,4	194,40	217,728
1	Manómetro 1 1/2" dial	675,2	675,20	756,224
1	Regulador de presión	3702,2	3702,20	4146,464
1	Teflón	22,7	22,70	25,424
1	Tubería PFA	820	820,00	918,4
1	Tubería Acero 1/8"	554,76	554,76	621,3312
9	Conectores macho	454,5	454,5	509,04
1	Bomba reciprocante	9827,71	9827,71	11.400,14
1	Bomba reciprocante	9667,05	9667,05	11.213,78
-	Mano de obra	1500	1500	1.500,00
Total (Bs.)				43459,3008

Considerando lo expuesto anteriormente, el valor de inversión inicial obtenido representa la mayoría del costo requerido para el diseño y es de: Bs. 43459,30.

Es importante destacar que en el cálculo anterior, no se incluye el costo de:

- (a) El material de fabricación de los tanques, el material del soporte del módulo de las membranas y del panel de válvulas, pues estaban disponibles para el proyecto así como también el módulo de las membranas y el Filtratest.
- (b) El traslado de las bombas.
- (c) La instalación de válvulas, accesorios y conexión de líneas.
- (d) El acondicionamiento del sitio (limpieza, lijas, pintura y brochas).
- (e) Las herramientas (doblatubos, desbarbadores, taladros, cortatubos, caja de herramientas).

Además, es de suma importancia considerar que el monto invertido en “mano de obra” incluye: la construcción de tanques, instalación de bombas, y acondicionamiento del lugar elegido, así como el hecho de tener disponibles la mayoría de los equipos principales de la planta, lo que se traduce en un ahorro fundamental disminuyendo notablemente el monto de inversión inicial.

Sólo el ahorro correspondiente a las bombas fue de Bs. 21.845,33 (3340 €), el monto en Bolívares se calculó partiendo del hecho de que 1\$ es igual a 1,358€, y el dólar oficial es igual a Bs. 4,30.

Cabe destacar, que se disponía el monto restante correspondiente a la diferencia del total y el ahorro (21.614,00) para la adquisición de tubing, válvulas, accesorios e instrumentos, así como también pintura y demás

4.2.7. Criterios de diseño de equipos, dimensionamiento de tuberías y válvulas de regulación, selección de válvulas de paso rápido

4.2.7.1. Dimensionamiento de tuberías:

Para el dimensionamiento de las tuberías se consideraron tres aspectos importantes.

-
- (a) Los caudales nominal de la bomba Speck® modelo NP10/4-140 $3,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, así como también el caudal máximo de la bomba JR-104A Madden $4,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ esto, con el objetivo de garantizar que se puedan utilizar las dos bombas.
 - (b) El tipo y tamaño de la conexión de succión y descarga de las bombas (1/4" NPT).
 - (c) Las conexiones de entrada y salida al módulo (1/8" NPT).
 - (d) Regímenes de flujo obtenidos, los cuales fueron satisfactorios y se describen en la siguiente subsección (Verificación del uso de las bombas disponibles).

Con respecto a la elección del FEP como material de una de las tuberías utilizadas, se tiene lo siguiente:

- (a) Son altamente resistentes fluidos abrasivos y a la mayoría de los solventes.
- (b) Pueden soportar temperaturas desde -270°C hasta 205°C (Chemlab®, 2010)
- (c) Los únicos materiales que atacarán este tipo de material son metales de álcali fundidos o disueltos, como el sodio en el amoníaco líquido, que extraerá el flúor de la molécula para dejar la superficie oscurecida (de carbón).
- (d) Debido al recorrido de algunas líneas, es más sencillo colocar tuberías de este tipo de material pues es semiflexible, a diferencia del acero.
- (e) Es transparente, por lo que permitirá observar el proceso de formación de la emulsión con mayor facilidad.
- (f) Tiene un bajo coeficiente de fricción, por lo que la caída de presión en dichas líneas sería baja.
- (g) Soporta presiones de 213 psi @ 70°F (Chemlab®, 2010)

Por otra parte, se eligió al acero como material para utilizar en otro tipo de líneas en las que se requiere más rigidez e igual resistencia a sustancias químicas variadas, tales como solventes aromáticos, éteres, aceites minerales, cloruros, sulfaots, nitratos, leche y sus derivados, entre otros (Coulson&Richardson, 2006) , además por su espesor y características particulares, puede soportar altas presiones, la máxima para el tubing de 1/8" y de 1/4" es de 8500 psi y 4000 psi respectivamente.

4.2.7.2. Verificación del uso de las bombas disponibles

En el diseño realizado no se seleccionaron las bombas de una amplia gama de posibilidades según las necesidades del sistema, como suele suceder en la mayoría de los procesos, sino que se partió de la disponibilidad de tres bombas, dos de diafragma (JR.104A Madden[®]) y una tipo pistón (NP10/4-140 Speck[®]) mostradas en la Figura N° 26, las cuales no se estaban usando en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Central de Venezuela y que posteriormente se pusieron a la disposición de la línea de investigación “Emulsiones con membranas”; según los requerimientos del sistema se verificó si dichas bombas funcionarían o no para el proceso, esto, debido al alto costo de dicho equipo en el mercado y a las limitantes económicas del presente proyecto.

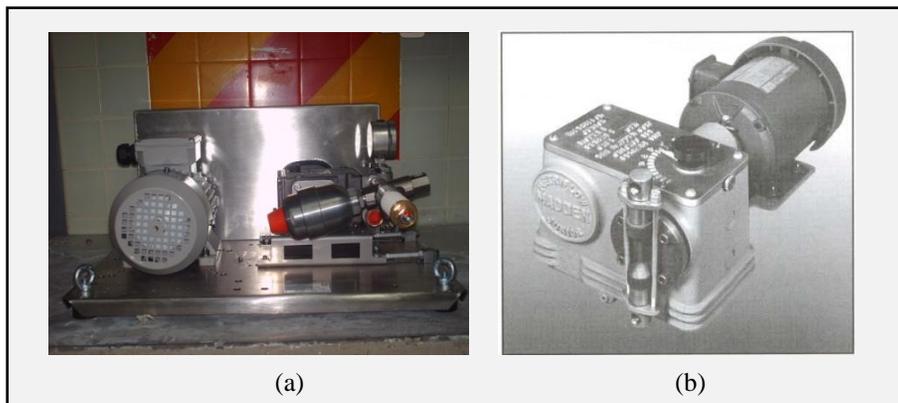


Figura N° 26. (a) Bomba NP10/4-140 Speck[®] . (b) Bomba JR.104A Madden[®]

Para verificar el correcto funcionamiento de las bombas de diafragma y su aplicabilidad en el proyecto se realizó una inspección visual de las mismas, se verificó que el nivel de aceite estuviese en la marca correcta, así como también que las conexiones eléctricas y perilla de ajuste estuviesen en buenas condiciones. De lo anteriormente expuesto se tiene que la válvula de succión de una de las bombas se dañó y a ambas se les reparó la conexión eléctrica del motor, además de instalarles un guardamotor para poder garantizar su durabilidad durante las sesiones de producción.

Posteriormente se generó la curva de calibración de la bomba P-101 aplicando el procedimiento descrito en el Apéndice VI. Los resultados obtenidos se muestran a en la Figura N°27.

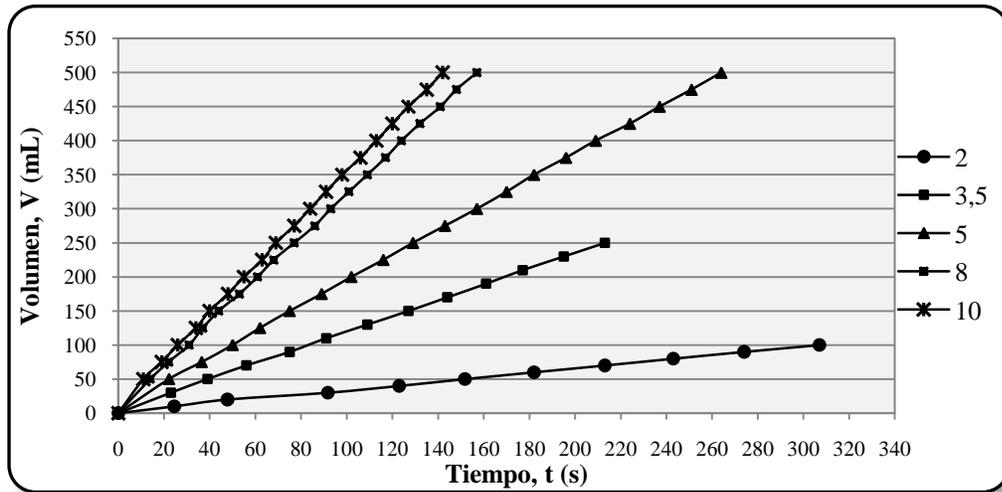


Figura N° 27. Gráfica del comportamiento del volumen descargado por P-101 para cada ajuste de carrera en función del tiempo.

El comportamiento de las curvas de la gráfica anterior (Figura N°27) corresponde al normal presentado por las bombas de desplazamiento positivo, es decir, el volumen descargado con el incremento del ajuste de la carrera mientras transcurre el tiempo también se incrementa.

A partir de los ajustes lineales de las curvas presentadas en la Figura N°27 se obtiene el caudal correspondiente a los ajustes de carrera fijados, definido como la pendiente de la recta (volumen/tiempo). En la Tabla N°7 se presentan dichas ecuaciones y los respectivos caudales,

Tabla N°7. Datos de calibración de la bomba P-101

Ajuste	Ajuste lineal	R ²	Caudal, Q (mL/s)
2	$V=0,3212.t + 1,5927$	0,9986	0,32
3,5	$V= 1,1641.t + 2,9757$	0,9997	1,16
5	$V = 1,873.t + 7,0241$	0,9998	1,87
8	$V = 3,1671.t + 5,51$	0,9997	3,17
10	$V = 3,4732.t + 8,0517$	0,9997	3,47

El cuadrado del coeficiente de correlación lineal indica que los caudales obtenidos son valores confiables, a partir de éstos se genera entonces la curva de calibración de la bomba P-101, como Figura N°28.

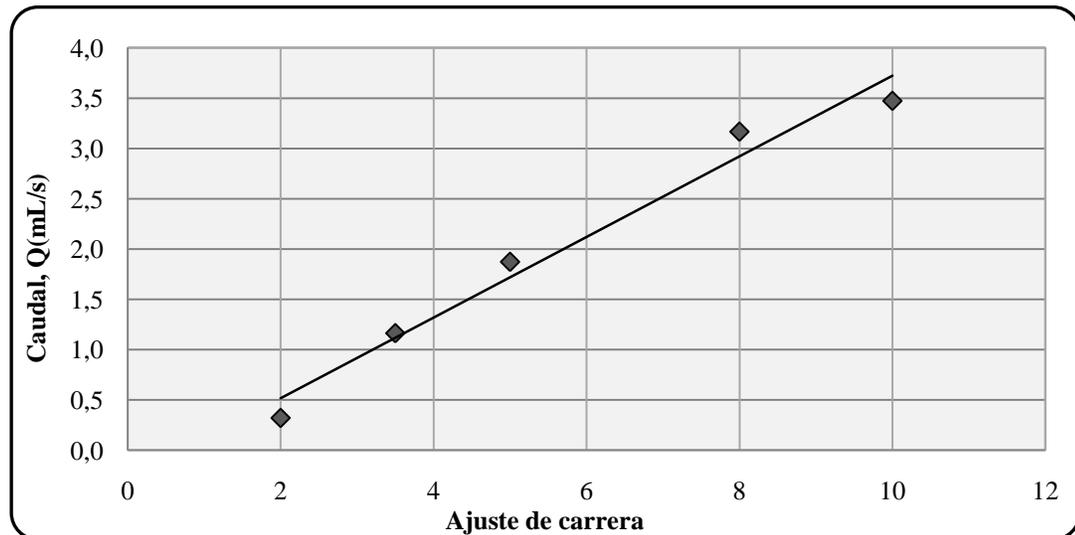


Figura N° 28. Curva de calibración de la bomba P-101

La curva de calibración obtenida presenta un buen comportamiento, lo cual se evidencia en el valor de R^2 igual a 0,9736 lo que significa que el caudal de la bomba varía de forma lineal al variar el ajuste de carrera y coincide con lo presentado por Kenneth (1992) en la gráfica de curva de calibración de bombas de desplazamiento positivo correspondiente a la Figura N°21.

Al observar la Figura N°28, se tiene que el máximo caudal obtenido para el sistema planteado es de 3,47 mL/s, al hacer la conversión a galones por hora, el caudal resulta igual a 3,30 gph; dicho caudal es menor al caudal máximo de la bomba (4gph) indicado por el fabricante, la diferencia obtenida se puede atribuir a un desajuste en el sistema mecánico que regula la carrera del pistón, además, cabe destacar que dichas bombas ya fueron usadas y al finalizar dicho uso transcurrió un período de tiempo en el cual no se prendieron.

Partiendo del caudal máximo se calculó el número de Reynolds correspondiente a cada tubería y a la sección flujo cruzado en el módulo, para poder determinar el régimen de flujo. En la tabla N°8, se presentan dichos valores.

Tabla N°8. Cálculo del estimado del régimen de flujo teniendo como fluido de proceso agua

Tubing	Material	D_i (m)	D_e (m)	Área (m^2)	v (m/s)	Re
1/8"	Acero	$1,40 \cdot 10^{-03}$	$3,18 \cdot 10^{-03}$	$1,53 \cdot 10^{-06}$	2,26	3752,86
1/4"	Acero	$4,57 \cdot 10^{-03}$	$6,35 \cdot 10^{-03}$	$1,64 \cdot 10^{-05}$	0,21	1146,71
1/8"	FEP	$1,60 \cdot 10^{-03}$	$3,20 \cdot 10^{-03}$	$2,01 \cdot 10^{-06}$	2,10	3276,72

Como se observa en la tabla anterior (Tabla N°8), el régimen de flujo en los tubing de 1/8" de diámetro es "en transición", pues el número de Reynolds resultó entre 2000 y 4000, con respecto a la tubería de 1/4", el régimen es laminar.

Usualmente en los procesos de diseño, cuando se obtienen regímenes en transición se trata de disminuir el tamaño de la tubería o incrementar el caudal para poder alcanzar flujo turbulento o laminar y poder estudiar el comportamiento del fluido, sin embargo, en el caso en estudio ninguna de las dos opciones eran viables debido a que el tamaño de las conexiones de entrada y salida del módulo son de 1/8", disminuir aún más el diámetro de la tubería conllevaría a posibles taponamientos en el sistema e incrementos de la caída de presión.

Adicional a lo expuesto anteriormente se tiene que los tamaños de las conexiones de la bomba ya estaban definidos por el tipo de bomba y un cambio de diámetro brusco en las líneas de descarga y succión de no es favorable para el sistema debido a las caídas de presión asociadas, todo esto sin incluir que a mayor diámetro las tuberías son más costosas.

De la misma forma se calculó el número de Reynolds para el caudal nominal ($3,3 \cdot 10^{-5} m^3/s$) de la bomba Speck® modelo NP10/4-140, se obtuvo lo mostrado en la tabla N°9:

Tabla N°9. Regímenes de flujo para caudal nominal de la bomba NP10/4-140 SPECK ®

Tubing	Material	D_i (m)	D_e (m)	Área (m^2)	v_f (m/s)	Área (m^2)	Re
1/8"	Acero	$1,40 \cdot 10^{-03}$	$3,18 \cdot 10^{-03}$	$1,53 \cdot 10^{-06}$	21,72	$1,53 \cdot 10^{-06}$	29754,85
1/4"	Acero	$4,57 \cdot 10^{-03}$	$6,35 \cdot 10^{-03}$	$1,64 \cdot 10^{-05}$	2,03	$1,64 \cdot 10^{-05}$	9091,76
1/8"	FEP	$1,60 \cdot 10^{-03}$	$3,20 \cdot 10^{-03}$	$2,0 \cdot 10^{-05}$	16,65	$2,01 \cdot 10^{-06}$	25979,70

De acuerdo a las investigaciones revisadas, se obtienen los números de Reynolds mostrados en la Tabla N°10:

Tabla N°10. Regímenes de flujo en investigaciones previas

Autores	Número de Reynolds	Régimen
Vladisavljević . et. al. (2000)	1700	Laminar
Vladisavljević , Lambrich, Nakajima, Schubert (2004)	1700-34000	Laminar-Transición-Turbulento
Williams et. al. 1998	3733-16967	Transición-Turbulento
Vladisavljević , Schubert (2002)	8500	Turbulento

Por otra parte, es necesario conocer el régimen de flujo en el área de flujo cruzado para los dos caudales utilizados previamente, pues la obtención de una distribución de tamaño de gotas estrecho, en parte, está afectada por estos parámetros, tal como en el caso de Williams et. al. (1998), que presentan de cuatro de los caudales empleados, con tres obtuvieron régimen turbulento y otro en transición, obteniendo la distribución más estrecha con la mayor velocidad de flujo cruzado, sin embargo, indican que al seguir incrementando dicha velocidad llegará hasta cierto valor en donde no se observarán cambios notables en la distribución.

Para el cálculo del número de Reynolds en el área de flujo de fase continua se aplicó Ecuación N°17 y resultó tal como en la Tabla N°11:

Tabla N°11 . Regímenes de flujo en el área de flujo cruzado

Caudal	Número de Reynolds	Régimen
$4,2 \cdot 10^{-6}$	3994,1	En transición
$3,3 \cdot 10^{-5}$	31667,6	Turbulento

Los valores de Reynolds presentados en la Tabla N°11, indican que para el caudal máximo de la bomba JR-104A Madden® el régimen es “en transición”, muy cercano a 4000, casi turbulento, mientras que para el caudal nominal de la bomba NP10/4-140 SPECK® el régimen es turbulento.

En el caso de la bomba NP10/4-140 Speck ®, al observar la tabla N° 9 se tiene que todos los flujos obtenidos son turbulentos, y similares a los valores mostrados en la Tabla N°11, por lo que se recomienda en caso de utilizar la bomba Speck ® no superar considerablemente el caudal nominal de la misma, ya que al operar con flujos que tienen un número de Reynolds tan alto, el fluido no arrastrará las gotas salientes

con uniformidad, debido al contacto irregular entre el fluido y la superficie de la membrana.

Ahora, tener un régimen laminar o en transición no significa que no se puedan obtener emulsiones, si bien es cierto que con un fluido en régimen turbulento se obtienen distribuciones de tamaño de gota estrechos, se evidencia en la tabla N°10 que ya se han obtenido emulsiones cuando se tiene este tipo de flujos.

Además, para determinar si una u otra bomba es adecuada para el proceso, se debe calcular la pérdida total de energía en el sistema debido a válvulas, accesorios y tramos de tubería (h_L) que presenta el ciclo, para así tener definida la presión que debe superar dicha bomba. Para ello se aplicaron las ecuaciones presentadas en la sección 2.6.5.1.

Para determinar los factores de fricción en el caso de los flujos turbulentos, se empleó la Ecuación N° 21 que corresponde a las curvas del diagrama de Moody (Apéndice I), para flujos laminares el factor de fricción se calculó a partir de la Ecuación N°20.

Es importante destacar, que en el caso de las entradas y salidas del módulo de membranas se consideraron como expansiones y reducciones súbitas, tomando en cuenta el área de flujo del tubing de 1/8" de FEP o acero y el área de flujo rectangular del módulo, los números de Reynolds se calcularon a partir de de las Ecuaciones N°15 y N°17, respectivamente.

Los valores del coeficiente de resistencia y longitudes equivalentes se obtuvieron mediante lo mostrado en el Apéndice VII, para las vueltas de tubería se consideraron las Figuras N°14 y N°15, así como también la Ecuación N°24.

En la Tabla N°12 se presentan los resultados obtenidos para cada válvula, accesorio y línea.

Tabla N°12. Pérdida de energía en la descarga

Definición	4,2E-6 (Madden)		3,33E-5 (Speck)	
	Le/D o K	h (m)	Le/D o K	h (m)
Tramo de tubería	10,28	0,002	10,28	0,10
Válvula V-102 (check)	2,00	0,007	2,00	0,42
Te estándar, flujo directo	20,00	0,004	20,00	0,19
Tramo de tubería	79,18	0,015	79,18	0,74
Tramo de tubería	59,06	0,011	59,06	0,55
Tubería de 1/4" doblada 90°	12,00	0,002	12,00	0,11
Tubería de 1/4" doblada 90°	12,00	0,002	12,00	0,11
Válvula V-104	-	71,000	-	71,00
Reducción 1/4" a 1/8" (k)	0,45	0,002	0,45	10,92
Tramo de tubería	66,71	0,012	66,71	0,62
Caída de presión en la entrada del módulo	1,00	0,006	1,00	0,39
Área de flujo del modulo	418,64	0,106	418,64	3,81
Caída de presión a la salida del módulo	1,00	0,000	1,00	0,00
Tramo de tubería	471,88	4,562	471,88	163,30
Válvula V-105	90,00	0,870	90,00	0,87
Tramo de tubería	337,50	3,263	337,50	116,80
Caída de presión en la entrada del módulo	0,69	0,004	0,69	0,27
Área de flujo del modulo	418,64	0,000	418,64	0,00
Caída de presión a la salida del módulo	1,00	0,223	1,00	13,99
Tramo de tubería	412,50	3,988	412,50	142,75
Válvula V-106	0,20	0,045	0,04	0,56
Tramo de tubería	123,13	1,190	123,13	42,61
Válvula V-107	90,00	0,870	90,00	31,15
Tramo de tubería	168,93	1,633	168,93	58,46
Tramo de tubería	493,92	4,775	493,92	170,93
Reducción 1/8" a 1/4"	0,82	0,315	0,82	19,79
Salida TK 101 (K)	1,00	0,383	1,00	24,08
Total	-	93,28	-	874,53

En la Tabla N°12 se observa cómo del menor al mayor caudal correspondiente a cada bomba se incrementan también las pérdidas menores y por fricción debido al aumento de la velocidad del fluido.

Las pérdidas menores y por fricción de los tubing en la línea de descarga, donde el fluido es bombeado por la bomba de diafragma (JR-104A Madden®), considerando como fluido de proceso el agua, resultó igual a 98,03 m o 139,0psi, la máxima presión de descarga de la bomba es de 250 psi, por lo que podrá vencer dicha pérdida de energía, además la caída de presión considerada en la válvula reguladora es alta, en la práctica es posible que sea menor.

Con respecto a la carga de succión neta positiva, el NPSH requerido es de -304 cm, sin embargo para que tenga un buen funcionamiento es recomendable que el NPSH disponible esté entre 0 – 60,8 cm, según el fabricante.

Las medidas se tomaron en principio del plano en 3D preliminar realizado (AUTOCAD) y posteriormente se rectificaron las medidas.

El valor de pérdida de energía de la bomba NP10/4-140 Speck® es menor que la presión de descarga de la misma.

Con respecto a la resistencia de los materiales de fabricación de la bomba a la corrosión o desgaste ocasionados por distintas sustancias, se consideró la información suministrada por JR-104A Madden® presentada en el Apéndice VIII, en el cual se muestra un cuadro con una amplia lista de sustancias y su efecto en los materiales de los cuales se fabrican los diafragmas de las bombas: el diafragma representa la parte más sensible de la bomba ya que de éste depende en gran parte la exactitud del caudal descargado, en resumen indica que puede soportar sustancias ácidas, cáusticas y solventes.

El comportamiento de la bomba P-102 es igual al comportamiento de P-101 por ser del mismo tipo y tener exactamente las mismas características.

Con respecto a la resistencia de los materiales de fabricación de la bomba NP10/4-140 Speck®, se tiene que están fabricadas con materiales altamente resistentes:

- (a) La carcasa de la válvula está hecha de latón especial/bronce fundido.
- (b) Émbolo, de cerámica con acero inoxidable.
- (c) Válvulas de acero inoxidable.
- (d) Mangas: de nitrilo con tela de refuerzo.

Por generar menor caída de presión en el sistema, y ser de fácil manejo, se elige la bomba JR-104A Madden® para operar, considerando además que se tienen dos disponibles y una se utilizará para el ciclo de emulsión simple/concentrada y la otra para el ciclo de emulsión doble.

Los cálculos correspondientes a esta sección se presentan en el Apéndice IX.

4.2.7.3. Dimensionamiento de válvulas de regulación y selección de válvulas de paso rápido

En el sistema es de suma importancia controlar dos variables: el flujo de entrada de fase continua al módulo y la presión en esa misma línea, así como en la salida del módulo. Para ello fue necesario dimensionar válvulas que permitieran regular dichas variables, partiendo del caudal que regularán de la presión máxima de descarga de la(s) bomba(s).

Para dimensionar las válvulas se calculó el coeficiente de flujo, la caída de presión considerada fue de 7 bar (101,52 psi), debido a que es la diferencia entre la presión máxima de la bomba JR-104A Madden® y la presión máxima que puede suministrar el Filtratec a la fase a dispersar.

Como gravedad específica se utilizó 1 y el caudal de diseño considerado fue el doble de los caudales máximo de JR-104A Madden®, nominal de NP10/4-140 NP10/4-140 SPECK®, según lo expuesto en sección 2.6.5.2., específicamente la ecuación N°26 y N°27.

Tabla N°13. Coeficiente de flujo de válvulas

Caudal elegido	Q (gpm)	Caudal de diseño , q_d (gpm)	C_v (adim)
Caudal máximo JR-104A Madden®	0,07	0,13	0,013
Caudal nominal Speck®	2,00	4,00	0,390

De la Tabla N°13 se tiene que es posible adquirir válvulas con coeficientes de flujo comprendidos entre 0,0129 y 0,39, se debe considerar también dependiendo del tipo de válvula: la temperatura, presión máxima aguas abajo, presión de disparo y en todos los casos deben soportar las presiones de descarga de las bombas.

Por lo expuesto anteriormente, se eligieron las siguientes válvulas:

- La válvula de regulación de flujo, es de tipo aguja, con un $C_v=0,09$, probadas por el fabricante hasta una presión de 1000 psi. Por lo que se debe tener especial cuidado de no superar esta presión en el sistema (sólo si se operase con la bomba NP10/4-140 SPECK®).

-
- La válvula de regulación de presión, es de tipo sensor de diafragma, con un Cv de 0,02 y regulación de presión de 0-250 psi, este tipo de válvulas son sumamente costosas.

Por otra parte se tiene que el material elegido para cada válvula es el acero y fue seleccionado por su alta resistencia y durabilidad.

En el caso de las válvulas de paso, de acuerdo al diámetro de la tubería 1/8" y 1/4" y presiones en el sistema, se seleccionaron válvulas de bola de dos vías y tres vías, que operan abierto-cerrado.

Los cálculos tipo del dimensionamiento se muestran en el Apéndice IX.

4.2.7.4. Validación del uso del módulo de membranas

El módulo disponible para realizar el proyecto está fabricado de acero inoxidable y soportes de membranas metálicas porosas (Sika R-80) de acero inoxidable con aleaciones de titanio, monel, y otros materiales especiales, es el mostrado en la Figura N°29, en el cual se destacan las direcciones y sentidos de los flujos tanto de fase continua, como de fase dispersa. Cabe destacar que el flujo de fase a dispersar es perpendicular al plano mostrado en la Figura N°29c. El área de flujo de la fase continua (de sección rectangular) se forma al colocar la pieza indicada en la Figura N°29a sobre la Figura N°29c.

Lo descrito anteriormente, se repite para las dos secciones restantes del módulo.

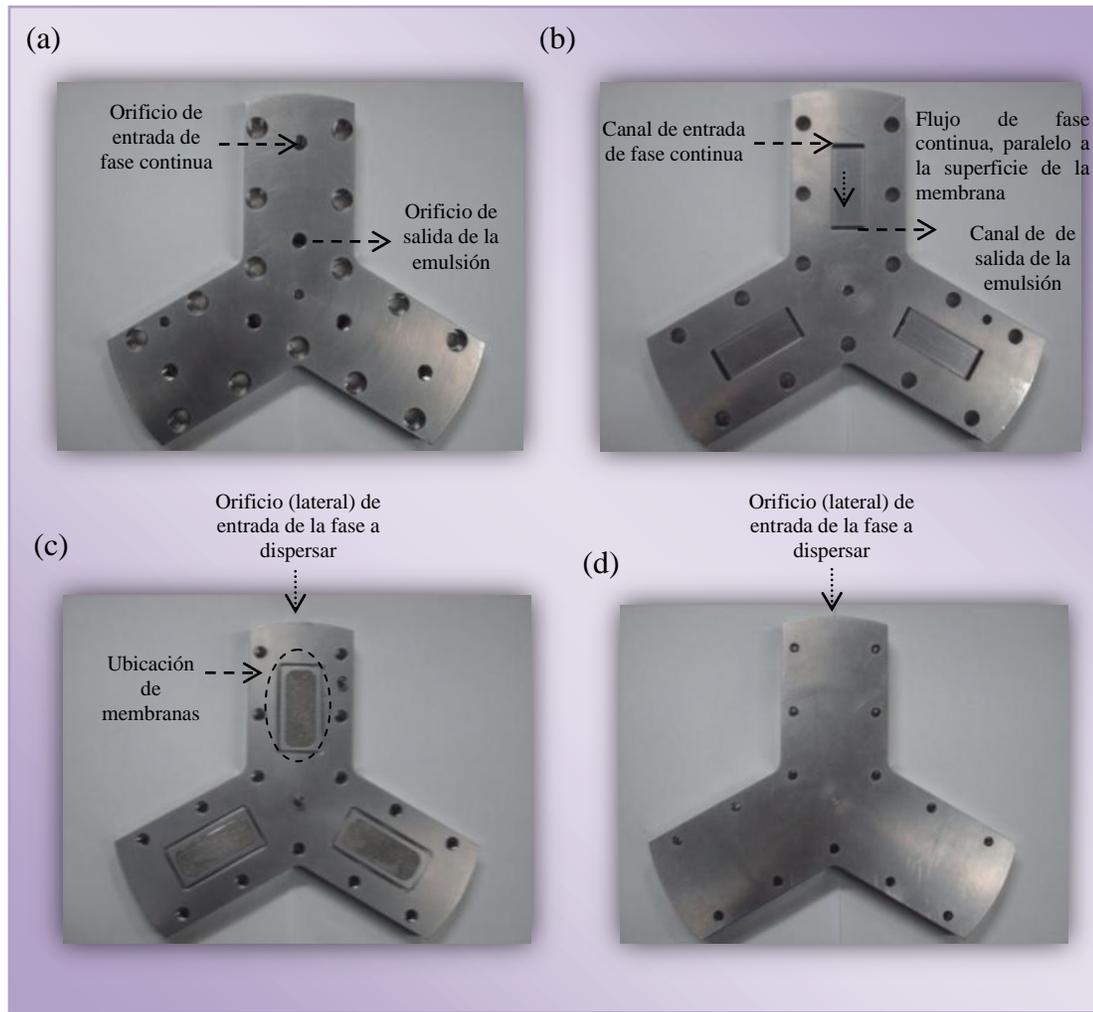


Figura N°29. (a) Pieza superior del módulo vista planta parte superior (b) Pieza superior del módulo vista planta parte inferior (c) Pieza inferior del módulo vista planta parte superior (d) Pieza inferior del módulo vista planta parte inferior.

La caída de presión en el soporte de la membrana es un parámetro muy importante a tomar en cuenta, pues de ella depende la circulación del flujo de fase a dispersar a través del módulo y por ende también afecta el tamaño de gota de la emulsión a producir, la cual se puede calcular con la Ley de Darcy (Ecuación N°12) (Gkn, sinter metals., s.f.). Como referencia se tiene la gráfica de caída de presión para el agua a 20°C mostrada en la Figura N°30, es el resaltado con el óvalo rojo, en cualquier caso es menor que 0,15 psi.

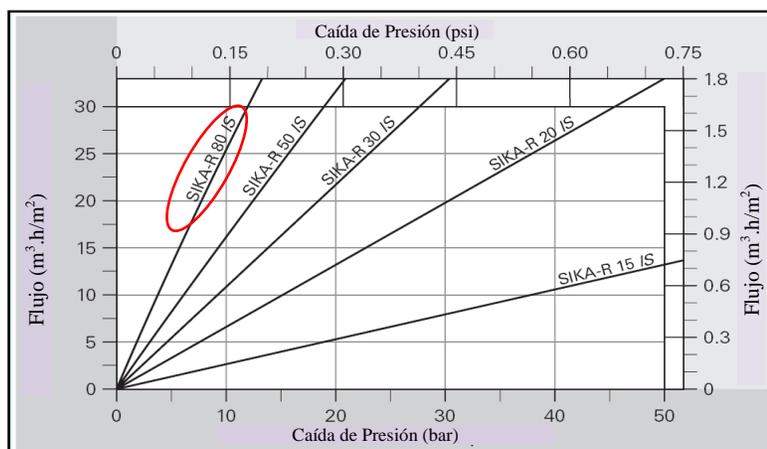


Figura N°30. Caída de presión en la superficie porosa metálica del módulo (Gkn Sinter Metals, s.f.)

Es importante destacar que el módulo de membranas se diseñó para soportar presión mucho mayor a las requeridas, ya que las presiones para nanofiltración son mucho mayores que la presión del proceso de emulsionar con membranas. Por ello es que se observa que pueden alcanzar altos valores de caída de presión, sin embargo, considerando los bajos flujos en el sistema planteado, se espera que la caída de presión sea baja.

El máximo flujo de agua que puede atravesar el través del soporte poroso es de $30\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$, valor que es considerablemente superior al flujo de agua de fase a dispersar reportado por distintos investigadores (ver Apéndice X). Es importante destacar que ese es el valor que se tiene como referencia, proveniente de la gráfica de flujo versus caída de presión publicada por SIKA®, el fabricante del soporte, por lo que al utilizar fluidos con una viscosidad distinta a la del agua se tendrán distintos valores de flujo dependiendo de las propiedades del fluido, sin embargo, considerando que el máximo valor posible flujo de agua en el soporte, es mucho mayor al máximo valor de flujo reportado por los investigadores señalados, es posible aseverar que no se tendrán limitaciones notables en este sentido.

Con respecto al material, usualmente se emplea en su fabricación acero inoxidable con aleaciones de monel 400, inconel 600/625, hastelloy B,C22, C276,

titanio u otros materiales de alta resistencia química y estabilidad térmica; el soporte es dimensionalmente estable y resistente a fluctuaciones mecánicas.

4.2.7.5. Criterios de diseño de tanques de almacenamiento y producto final

- Los tanques de almacenamiento son cilíndricos horizontales y de fondo plano, abiertos a la atmósfera, motivo por el cual se debe tener especial atención cuando se opere a presiones que sean suficientes para salpicar o mojar la bomba.
- Se aplica la norma "STANDAR A.P.I. 650", para tanques de almacenamiento a presión atmosférica.
- Temperatura de operación no mayor a 93°C.
- Se empleó como material de fabricación placas de acero con medio y bajo esfuerzo a la baja tensión, debido a que puede hacerse el cuerpo y el fondo del tanque, además de la disponibilidad.
- Tiene una boquilla de entrada de fluido, una de salida y drenaje, no tiene válvulas de venteo porque no se requieren.
- Las boquillas están instaladas con sus ejes perpendiculares a las paredes del tanque.
- Material de fabricación: acero inoxidable.
- La capacidad de los tanques de fase continua y a dispersar es de 8 L (de acuerdo a la estimación de la capacidad).
- La altura mínima de líquido en el tanque es de 43,2mm, considerando el mínimo volumen calculado en la sección de 1,36 L.
- La altura máxima de líquido es de 254,65 mm, considerando el máximo volumen ocupado por la emulsión (8 L), ver sección 4.2.2.8.

4.2.8. Hojas de especificación.

Desde la Figura N°31 hasta la Figura N°35 se muestran las hojas de especificación de los tanques contenedores de fase continua, producto final, fase a dispersar, de las tres bombas disponibles y del soporte.

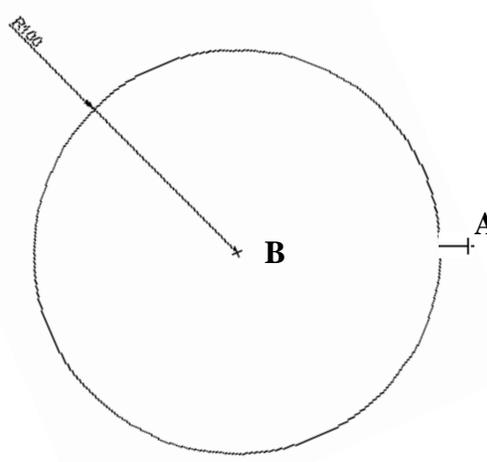
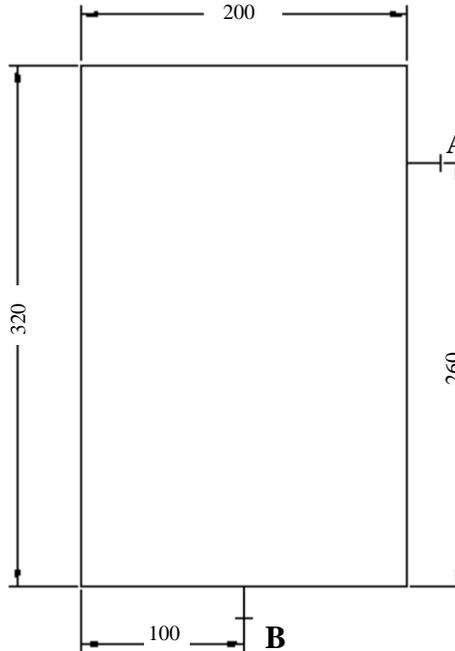
<i>EmulMemb</i>	HOJA DE ESPECIFICACIÓN		HOJA	
	TANQUE DE ALMACENAMIENTO		1/5	
General		Detalles mecánicos		
Identificación	TK-101	Boquillas		
N° de unidades	1	Iden.	Tamaño, pulg. (m)	Servicio
Planta	Emulsiones con membranas	A	¼ (0,00635)	Entrada de fase continua/emulsión/solución limpiadora
Servicio	Tanque de succión de P-101/Almacenamiento de fase continua/emulsión/solución limpiadora	B	¼ (0,00635)	Salida de fase continua/emulsión/solución limpiadora
Fluido	Fase continua/emulsión/solución limpiadora	Válvula de seguridad		No aplica
Diámetro (mm)	200	Venteo		No aplica
Altura (m)	320	Boca de visita		No
Capacidad (m ³)	8.10 ⁻³	Tope del tanque		Abierto
Nivel líquido, máx/nor/mín. (mm)	254,65/100/40	Válvula de drenaje		Sí
Tolerancia a la corrosión	0,35			
Tipo de geometría	Vertical/Cilíndrica			
Fondo y tope	Planos			
Condiciones de operación		Diseño y construcción		
Presión de operación (atm)	1	Presión de diseño (atm)	1,2	
		Temperatura de diseño (°C)	100	
		Aislamiento/espesor	No	
Temperatura de operación (°C)	<93	Espesor de la pared (mm)	2,2	
		Material	A 316	
Vista superior		Vista frontal		
				

Figura N°31. Hoja de especificación de TK-101

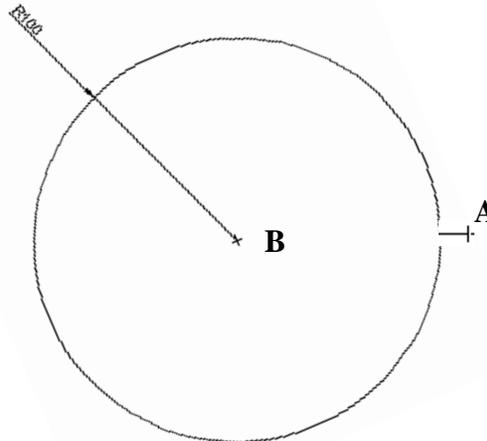
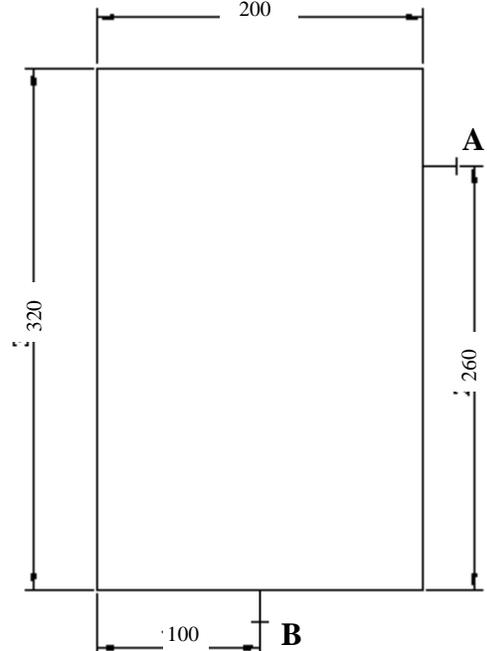
<i>EmulMemb</i>	HOJA DE ESPECIFICACIÓN		HOJA	
	TANQUE DE ALMACENAMIENTO		2/5	
General		Detalles mecánicos		
Identificación	TK-102	Boquillas		
N° de unidades	1	Iden.	Tamaño, pulg. (m)	Servicio
Planta	Emulsiones con membranas	A	¼ (0,00635)	Entrada de emulsión concentrada /emulsión doble /solución limpiadora
Servicio	Tanque de succión de P-102/Almacenamiento de producto final/emulsión concentrada/ dispersar/solución limpiadora	B	¼ (0,00635)	Salida de fase continua/emulsión concentrada/emulsión doble/solución limpiadora
Fluido	Emulsión concentrada/ fase a dispersar/solución limpiadora	Válvula de seguridad		No aplica
Diámetro (mm)	200	Venteo		No aplica
Altura (m)	320	Boca de visita		No
Capacidad (m ³)	8.10 ⁻³	Tope del tanque		Abierto
Nivel líquido, máx/nor/min, (mm)	254,65/100/40	Válvula de drenaje		Sí
Tolerancia a la corrosión	0,35			
Tipo de geometría	Vertical/Cilíndrica			
Fondo y tope	Planos			
Condiciones de operación		Diseño y construcción		
Presión de operación (atm)	1	Presión de diseño (atm)	1,2	
		Temperatura de diseño (°C)	100	
		Aislamiento/espesor	No	
Temperatura de operación (°C)	<93	Espesor de la pared (mm)	2,2	
		Material	A 316	
Vista superior		Vista frontal		
				

Figura N°32. Hoja de especificación de TK-102

<i>EmulMemb</i>	HOJA DE ESPECIFICACIÓN		HOJA
	BOMBAS JR- 104A Madden®	BOMBA NP10/4-140 Speck ®	3/5
Identificación	P-101/P-102	No está instalada	
Servicio	Proceso/limpieza	Proceso/limpieza	
Tipo	Diafragma	Pistón	
Fluido	Proceso/limpieza	Proceso/limpieza	
NPSH _R (m)	0,6	0,6	
Conexión de succión	¼ NPT	2 x G3/8	
Capacidad min/máx (gph)	0,4/4	31,70	57,06
Presión de descarga máx. (atm)	17,23	138,16	
Ciclos (rpm)	1725	725	1450
Voltaje (V)	110	230-400	
Suministro eléctrico (hp)	1/4	-	
Conexión de descarga	¼ NPT	2 x G3/8	
Temperatura		60°C	

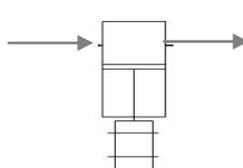


Figura N°33. Hoja de especificación de bombas disponibles

<i>EmulMemb</i>	HOJA DE ESPECIFICACIÓN		HOJA
	MÓDULO DE MEMBRANAS		4/5
Datos del Soporte			
Identificación	Interior de MO-101		
N° de unidades	3		
Flujo (m ³ /h.m ²)	<30		
Caída de presión permitida (psi)	<0,2		
Coeficientes de permeabilidad α (10 ⁻¹² m ²)	α (10 ⁻¹² m ²)	40	
	β (10 ⁻⁷ m)	50	
Espesor del filtro (mm)	3		
Grado de eficiencia (μ m)	60		
Presión de punto de burbuja (mbar)	7		
Nota: Datos válidos para agua a 20°C			
Las dimensiones del módulo se encuentran en los planos 4/7 y 5/7			

Figura N°34. Hoja de especificación del módulo de membranas

<i>EmulMemb</i>	HOJA DE ESPECIFICACIÓN	HOJA
	RECIPIENTE CONTENEDOR DE FASE A DISPERSAR	5/5
General		
Identificación	F-101	
Volumen (mL)	400	
Presión máxima (atm)	9,87	
Material de fabricación	Acero 1,4301	
Temperatura máxima de calentamiento en la chaqueta (°C)	120	
Material de fabricación	Acero 1,4301	
Tipo	Cilindrico/Vertical	
Vista frontal	Vista lateral	
Detalles		
A	Entrada de fluido de calentamiento/enfriamiento	
B	Salida de fluido de calentamiento/enfriamiento	
C	Salida de fase a dispersar	
D	Entrada de nitrógeno	

Figura N°35. Hoja de especificación del recipiente contenedor de la fase a dispersar.

9. Lista de Líneas.

En la Tabla N° 14 se presenta la lista líneas presentada en el diagrama de tuberías e instrumentación.

Tabla N°14. Lista de líneas.

Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química				Planta: EmulMemb	Documento: Lista de líneas	Hoja: 1/2		
				Proyecto: Planta con operación semicontinua para producir emulsiones empleando membranas				
N° de línea	Diámetro nominal (Plg.)	Material	Fluido	Estado del fluido	Tramo		Identificación	Longitud (m)
					Desde	Hasta		
001	¼	Acero	Fase continua	Líquido	TK-101	Punto de separación	¼"- P-001-AA1	0,082
002	¼	Acero	Fase continua	Líquido	Punto de separación	Punto de mezcla	¼"- P-002-AA1	0,358
003	¼	Acero	Fase continua	Líquido	Punto de mezcla	P-101	¼"- P-003-AA1	0,140
004	¼	Acero	Fase continua	Líquido	P-101	V-102	¼"- P-004-AA1	0,047
005	¼	Acero	Fase continua	Líquido	V-102	Punto de separación	¼"- P-005-AA1	0,362
006	1/8	Acero	Emulsión	Líquido	Punto de separación	V-103	⅛"-P-006-AA1	0,001
007	1/8	Acero	Emulsión	Líquido	V-103	Punto de mezcla	⅛"-P-007-AA1	0,372
008	¼	Acero	Fase continua	Líquido	Punto de Separación	V-104	¼"- P-008-AA1	0,270
009	¼	Acero	Fase continua	Líquido	V-104	MO-101 ²	¼"-P-009-AA1	0,305
010	1/8	FEP	Emulsión	Líquido	MO-101 ¹	V-105	⅛"-P-010-FEP	0,755
011	1/8	FEP	Emulsión	Líquido	V-105	MO-101B ¹	⅛"-P-011-FEP	0,540
012	1/8	FEP	Emulsión	Líquido	MO-101B ²	V-106	⅛"-P-012-FEP	0,660
013	1/8	FEP	Emulsión	Líquido	V-106	V-107	⅛"-P-013-FEP	0,197
014	1/8	FEP	Emulsión simple/concentrada	Líquido	MO-101B ³	V-108	⅛"-P-014-FEP	0,822
015	1/8	FEP	Emulsión simple/concentrada	Líquido	V-108	Punto de mezcla	⅛"-P-015-FEP	0,321
016	1/8	Acero	Emulsión	Líquido	V-107	Punto de mezcla	⅛"-P-016-AA1	0,236

Tabla N°14. Lista de líneas (continuación)

Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química				Planta: EcoMem		Documento: Lista de líneas	Hoja: 2/2	
				Proyecto: Planta con operación semicontinua para producir emulsiones empleando membranas				
N° de línea	Diámetro nominal (Pulg.)	Material	Fluido	Estado del fluido	Tramo		Identificación	Longitud (m)
					Desde	Hasta		
017	1/8	Acero	Emulsión	Líquido	Punto de mezcla	TK-101	1/8"-P-017-AA1	0,690
018	1/8	FEP	Emulsión	Líquido	V-107	V-109	1/8"-P-018-FEP	0,077
019	1/8	FEP	Emulsión	Líquido	V-109	Punto de mezcla	1/8"-P-019-FEP	0,266
020	1/8	Acero	Emulsión	Líquido	Punto de mezcla	TK-102	1/8"-P-020-AA1	0,515
021	1/4	Acero	Fase continua	Líquido	TK-102	Punto de separación	1/4"-P-021-AA1	0,082
022	1/4	Acero	Fase continua	Líquido	Punto de separación	V-113	1/4"-P-022-AA1	0,025
023	1/8	Acero	Fase continua	Líquido	V-113	P-102	1/8"-P-023-AA1	0,850
024	1/8	FEP	Emulsión doble	Líquido	P-102	MO-101C ¹	1/8"-P-024-AA1	0,402
025	1/8	FEP	Emulsión doble	Líquido	MO-101C ²	V-114	1/8"-P-025-FEP	0,740
026	1/8	Acero	Fase a dispersar	Líquido	V-114	Punto de mezcla	1/8"-P-026-FEP	0,322
027	1/8	FEP	Fase a dispersar	Líquido	V-105	MO-101C ³	1/8"-P-027-FEP	0,713
028	1/8	Acero	Fase a dispersar	Líquido	F-101	Punto de separación	1/8"-P-028-AA1	0,053
029	1/8	Acero	Fase a dispersar	Líquido	Punto de separación	V-111	1/8"-P-029-AA1	0,92
030	1/8	Acero	Fase a dispersar	Líquido	V-111	MO-101A ³	1/8"-P-030-AA1	0,480
001	1/4	Acero	Fase continua/Emulsión	Líquido	Punto de separación	V-101	1/4"-TD-001-AA1	0,082
002	1/4	Acero	Fase continua/Emulsión	Líquido	V-101	Drenaje	1/4"-TD-002-AA1	0,054
003	1/8	Acero	Fase continua/emulsión	Líquido	Punto de separación	V-110	1/8"-TD-004-AA1	0,026
004	1/8	Acero	Fase continua/emulsión	Líquido	V-110	Drenaje	1/8"-TD-005-AA1	0,071
001	1/4	Acero	Emulsión concentrada	Líquido	Punto de separación	V-112	1/4"-ND-001-AA1	0,081
002	1/4	Acero	Emulsión doble/simple/concentrada	Líquido	V-112	Drenaje	1/4"-ND-002-AA1	0,054
001	6,49.10 ⁻²	PVC	Nitrógeno	Gas	Cilindro de nitrógeno	PHV-101	1,65mmTD-001-PVC	0,6
002	6,49.10 ⁻²	PVC	Nitrógeno	Gas	PHV-101	F-101	1,65mm-TD-002-PVC	0,30

Tabla N°14. Lista de líneas (continuación)

Las abreviaciones colocadas en la identificación de cada línea significan lo siguiente:

- (a) AA1, FEP, PVC: indican el tipo de material, acero, FEP (copolímero fluorado de etileno propileno) y PVC, respectivamente.
- (b) NP: drenaje de producto no contaminado.
- (c) P: línea de proceso.
- (d) TD: línea de drenaje de agua aceitosa
- (e) ND: línea de drenaje de producto no contaminado.

4.2.10. Lista de válvulas , accesorios e instrumentos

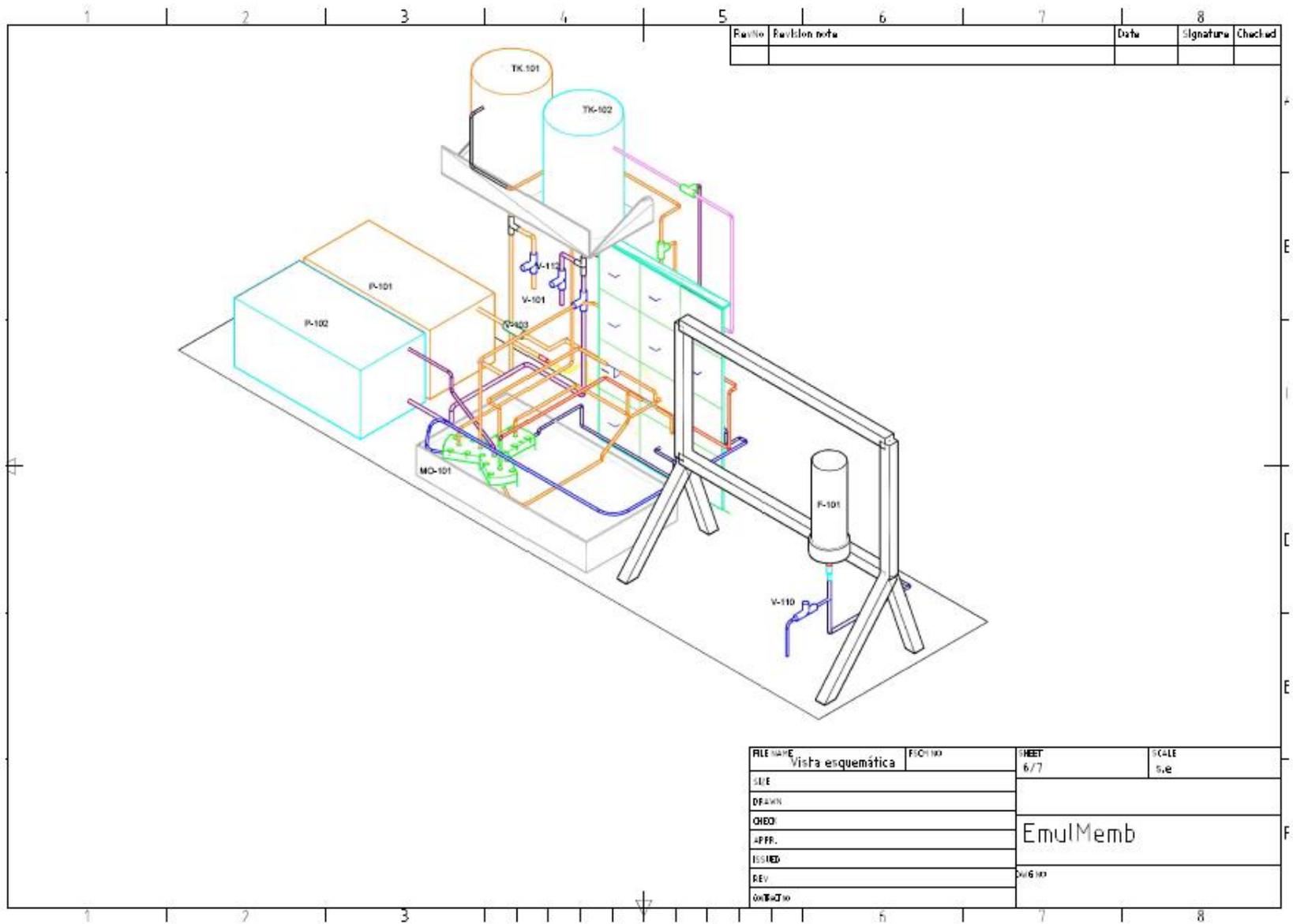
La Tabla N° 15 corresponde a la lista de válvulas, accesorios e instrumentos se presenta el tipo de válvula, su coeficiente de capacidad, el código que corresponde al fabricante, así como su identificación en el DTI.

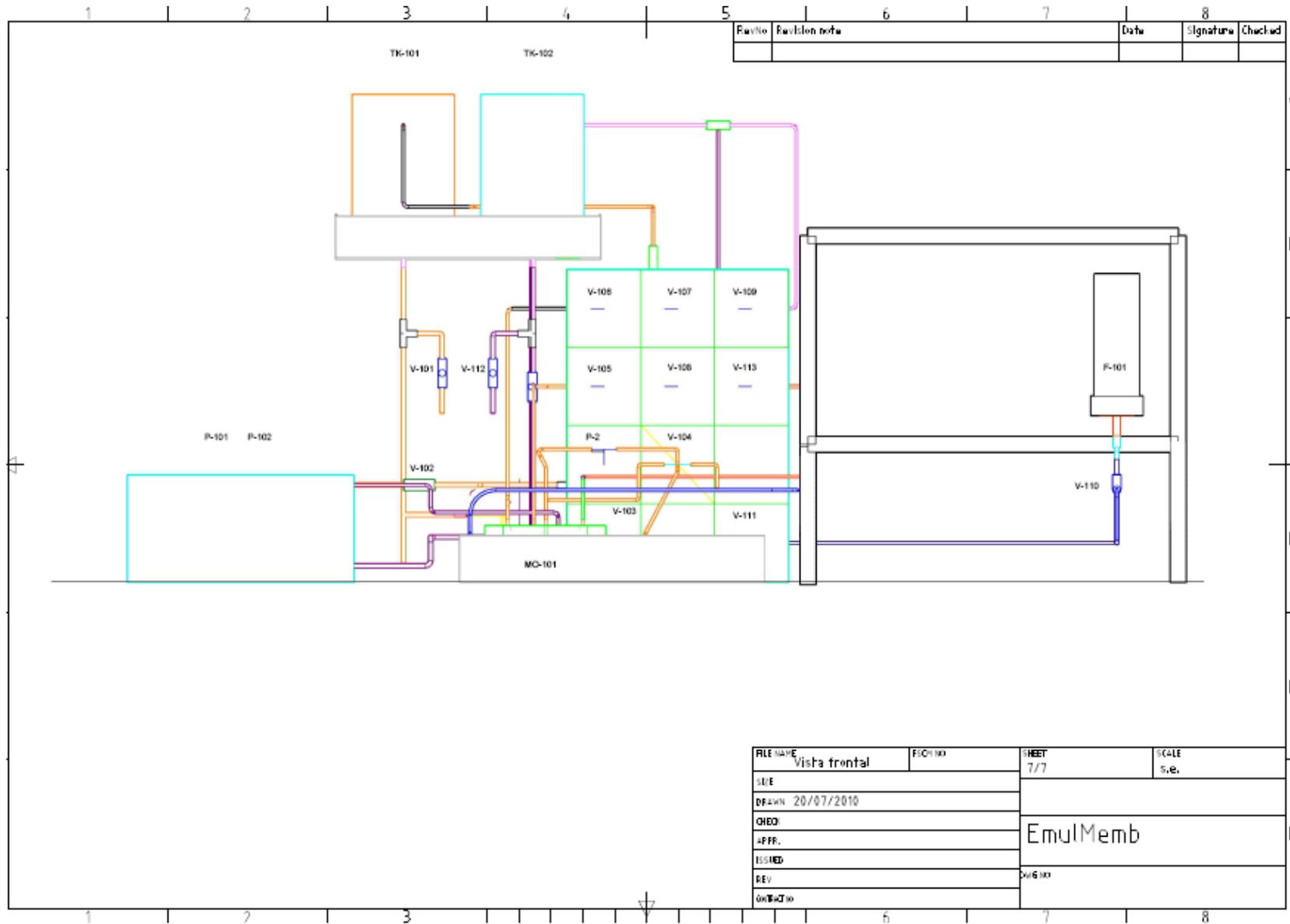
Tabla N°15. Lista de válvulas, accesorios e instrumentos

Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Química		Planta: EcoMem			Proyecto: Planta con operación semicontinua para producir emulsiones empleando membranas		
		Documento: Lista de válvulas, accesorios e instrumentos					
		Hoja: 2/2					
Válvulas							
Identificación	Código	Tipo	Tamaño	C _v	P _{máx} (psi)	T _{máx} (°C)	
V-101, V-106, V-108, V-109, V-110, V-111, V-112, V-113, V-114	SS-42GS4	De bola de dos vías	¼	0,35	2500	10-148	
V-102	SS-4C-1	Antirretorno	1/8"	0,47	1* 1000**	37-190	
V-103	SS-0V-S2	De aguja con bonete integral	1/8"	0,09		10-148	
V-105, V-107	SS-41GXS2	De bola de tres vías	1/8"	0,15	2500	10-148	
PHV-102 (V-104)	KPR1GRF411A20020	Reguladora de presión	¼"	0,02	3600 (de entrada)	80	
Accesorios e instrumentos							
Descripción	Cantidad	Código	Tamaño/Tipo				
Te	3	SS-200-3	1/8" OD				
Te	4	SS-400-3	¼" OD				
Reductor	7	SS-200-R-4	1/8" OD x ¼" OD				
Conector hembra	4	SS-400-7-4	¼" OD x ¼" NPTH				
Conector macho	2	SS-400-1-4	1/4" OD x ¼"				
Unión	1	SS-12M0-6-4	12MM OD x 1/4" OD				
Te corrida	1	SS-200-3TTF	1/8" OD X 1/8" OD x 1/8" NPTH				
Manómetro (0-16bar)	1	PGI-40M-BG16-LANX	1/8" NPTM, sin glicerina				

4.2.11. Planos de la planta

A continuación se presentan los planos de la planta realizados en AUTOCAD, en los que se ilustra recorrido de tuberías, la longitud de tuberías, equipos y, en general la distribución espacial del conjunto. Cabe destacar que dicho plano fueron pieza clave en la posterior construcción (Planos 6/7 y 7/7).





FILE NAME	Vista frontal	FIC#100	SHEET	7/7	SCALE	S.e.
DATE						
DRAWN	20/07/2010					
CHECKED						
APPROVED						
ISSUED						
REV						
DATE						
			EmulMemb			

.4.2.12. Procura y construcción

Partiendo de las listas de válvulas, accesorios, equipos, longitud de tuberías y planos obtenidos, productos de la ingeniería de detalle, se procedió a realizar la orden de compra de los mismos. De forma paralela se comenzaron a ejecutar las fases de construcción:

- (a) Acondicionamiento del sitio: inicialmente, el sitio elegido para realizar el montaje de la planta no se encontraba en buenas condiciones, se retiraron desechos que se encontraban allí, se cambiaron de sitio equipos que no se usaban, se limpiaron las paredes adyacentes así como el mesón y el piso, se lijó el mesón para retirar la pintura vieja y se renovó la misma. Lo expuesto anteriormente, se evidencia en la Figura N°36:



Figura N°36. Acondicionamiento del sitio.

- (b) Posteriormente se procedió a fijar las bombas al mesón, mediante el uso de ramplús y tornillos fijados en soportes de la bomba (Figura N° 37)



Figura N°37. Instalación de las bombas JR104A-Madden®

- (c) Luego de fijar ambas bombas se procedió a fijar el soporte de los tanques de tal forma que se alcance la altura de succión requerida y el panel de válvulas, en el cual se fijan las válvulas para evitar inestabilidad al girarlas. Se colocaron los tanques y el soporte del módulo de membranas (ambos fueron fabricados a partir de láminas de acero) (Figura N°38)

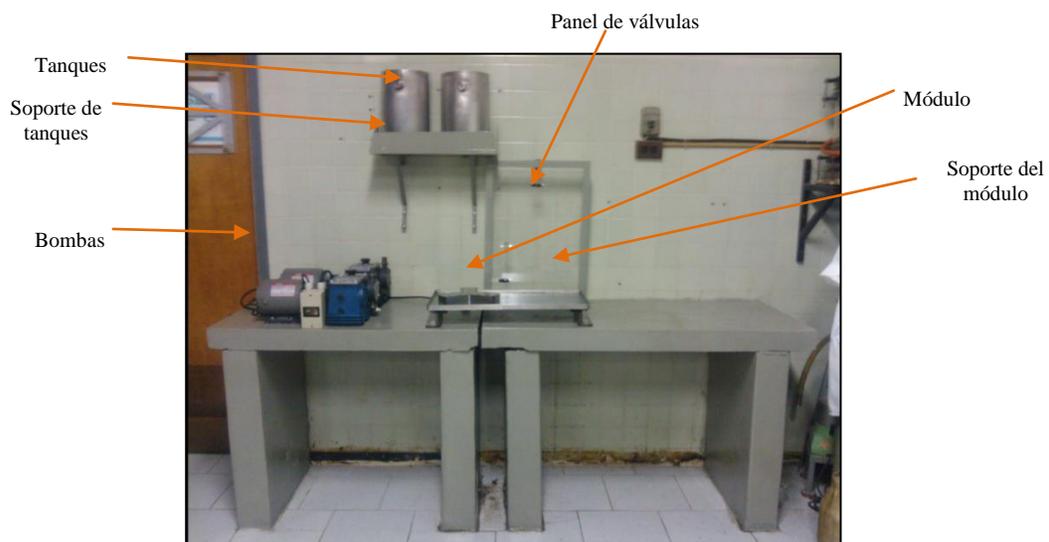


Figura N°38. Instalación del soporte, panel y tanques

- (d) Posteriormente, al adquirir las los tubing, válvulas, accesorios e instrumentos, luego de cumplir con los tiempos de espera del fabricante y partiendo del plano

en 3D de la planta, se conectaron los tubing a los equipos y válvulas correspondientes, cada conexión y ajuste se hizo de acuerdo a las normas Swagelok® (el fabricante). Cada tramo de tubing se cortó utilizando un cortatubos y posteriormente se limaron las asperezas sobrantes utilizando el desbarbador para evitar taponamientos posteriores durante el proceso. El producto se muestra a continuación en la Figura N°39.



Figura N°39. Planta EmulMemb

4.2.13. Prueba de Fugas

La prueba de fugas se realizó utilizando como fluido de proceso agua destilada, a presión atmosférica, y aplicando un ajuste de carrera igual a 8. Se conectó la bomba a la fuente eléctrica, se agregaron aproximadamente 2 L de agua destilada en TK-101. El ciclo probado fue el de emulsión simple, sin incluir la línea de flujo de fase a dispersar.

El ciclo de emulsión doble no se probó porque se dañó la válvula de succión de P-102 (Ver Figura N°40).



Figura N°40. Daño en la válvula de succión del fluido de P-102

Luego, se inició la operación según el procedimiento presentado en la siguiente sección (Manual de Operación), prentiendo la bomba, se verificó el recorrido de los fluidos, se observaron detenidamente todas las conexiones y no se hallaron fugas en el sistema. El flujo de agua llegó hasta TK-101 (Figura N° 41)



Figura N°41. Flujo de agua en TK-101 durante la prueba de fugas.

4.2.14. Manual de Operación

A continuación se describirá el procedimiento que debe realizarse en cada ciclo de operación.

(a) Ciclo de producción de emulsión simple

Para entender el proceso se recomienda ver la Figura N°42. Seguidamente se enumeran los pasos a seguir para producir una emulsión simple.

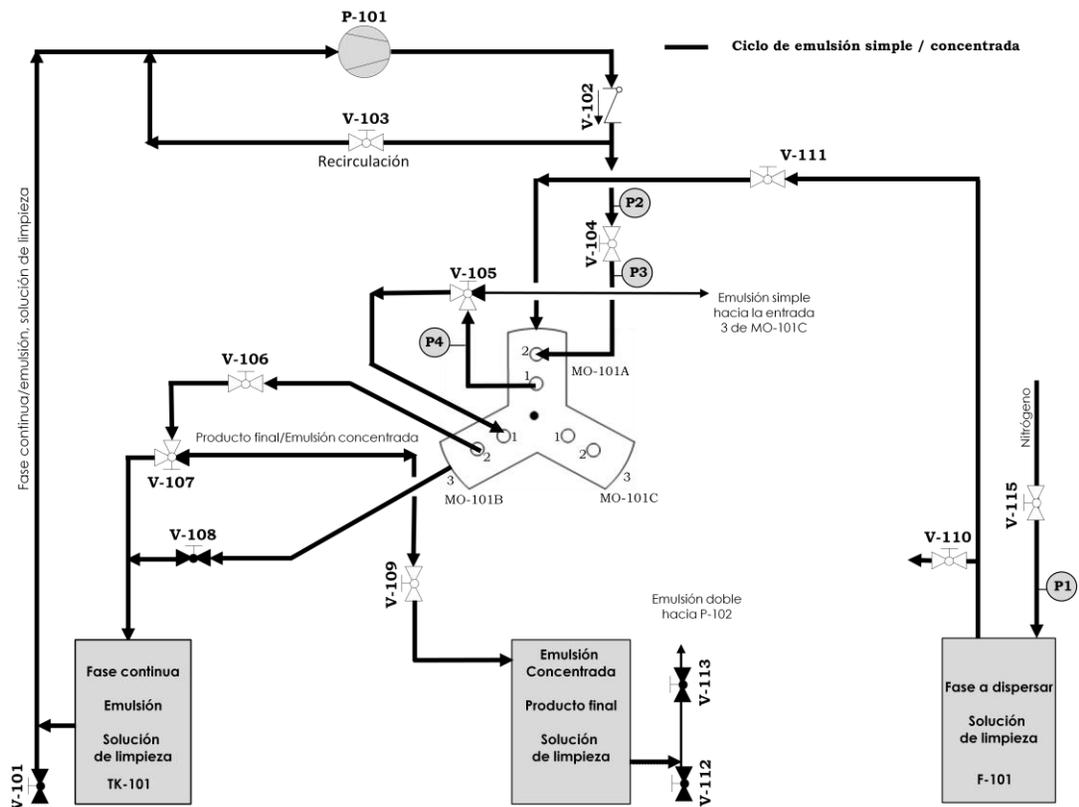


Figura N°42. Ciclo de producción de emulsión simple

1. Desconectar la parte superior del módulo, con cuidado, utilizando llave de 1/8".
2. Ubicar la parte superior del módulo justo al lado de la parte inferior, sobre el soporte destinado para tal fin.
3. Colocar en la sección MO-101A, la membrana elegida para el proceso, colocar la empaadura correspondiente.
4. Conectar nuevamente la parte superior del módulo sobre la parte inferior del mismo.
5. Verificar que todas las válvulas encuentren cerradas a excepción de V-103, V-104, V-105, V-106, V-107 y V-109.
6. Verificar que la dirección de flujo de la válvula V-105 se encuentre hacia la entrada 1 de la sección MO-101B.

-
7. Verificar que la dirección de flujo de la válvula V-107 se encuentre hacia la descarga al tanque TK-101.
 8. Verificar que la bomba P-101 se encuentre conectada a la toma de corriente.
 9. Agregar la fase continua en el tanque TK-101.
 10. Agregar la fase a dispersar en el recipiente F-101.
 11. Regular la presión de nitrógeno manipulando V-105 para iniciar la presurización de la fase a dispersar.
 12. Seguidamente iniciar la operación de la bomba P-101, fijar el ajuste de carrera adecuado.
 13. Regular el caudal de reciclaje manipulando V-103.
 14. Regular la presión de entrada al módulo manipulando V-104
 15. Durante todo el proceso monitorear la presión de entrada al módulo mediante P2 y P3, así como también la presión de fase a dispersar mediante P1.
 16. Monitorear el nivel del líquido en TK-101.
 17. Monitorear el nivel de fase a dispersar en F-101.
 18. Cuando ya no se tenga fase a dispersar en F-101 esperar unos segundos y cerrar V-105.
 19. Posteriormente cambiar el sentido de flujo de la válvula V-107, inmediatamente visualizar el nivel de líquido en TK-101, justo antes de terminarse, apagar P-101.
 20. Retirar el producto final almacenado en TK-102 por medio de V-112.

(b) Ciclo de producción de emulsión simple concentrada

Para entender el proceso de producción de emulsión simple concentrada se recomienda ver la Figura N°43.

1. Se repiten los pasos del 1 y 2 del ciclo anterior. Posteriormente colocar en la sección MO-101A, la membrana afín a la fase continua elegida para el proceso, colocar la empaquetadura correspondiente.
2. Colocar en la sección MO-101B, la membrana impermeable a la fase dispersa elegida para el proceso, colocar la empaquetadura correspondiente.

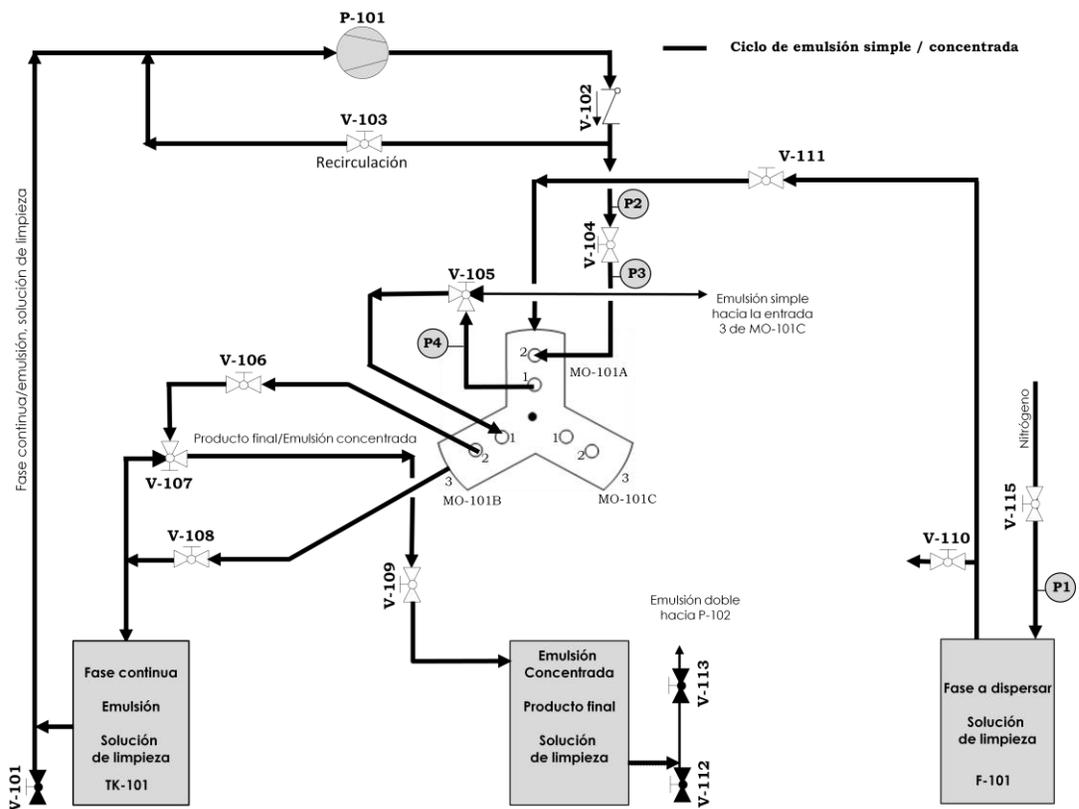


Figura N°43. Ciclo de producción de emulsión simple concentrada

3. Conectar nuevamente la parte superior del módulo.
4. Verificar que sólo estén abiertas las siguientes V-103, V-104, V-105, V-106, V-107, V-108 y V-109.
5. Verificar que la dirección de flujo de la válvula V-105 se encuentre hacia la entrada 1 de la sección MO-101B.
6. Verificar que la dirección de flujo de la válvula V-107 se encuentre hacia la descarga al tanque TK-102.
7. Repetir los pasos del 8 hasta el 17 del procedimiento para preparar emulsiones simples. Es muy importante chequear el nivel de líquido de TK-101 continuamente.
8. Cuando ya no se tenga fase a dispersar en F-101 esperar unos segundos y cerrar V-105.
9. Apagar la bomba P-101.
10. Retirar el producto final de TK-102 abriendo V-112.

11. Si queda alguna cantidad de líquido en TK-101 drenar abriendo V-101.

12. Por último, llevar a cabo el ciclo de limpieza.

(c) Ciclo de emulsión doble.

En la Figura N°44 se presenta el esquema correspondiente al ciclo de emulsión doble.

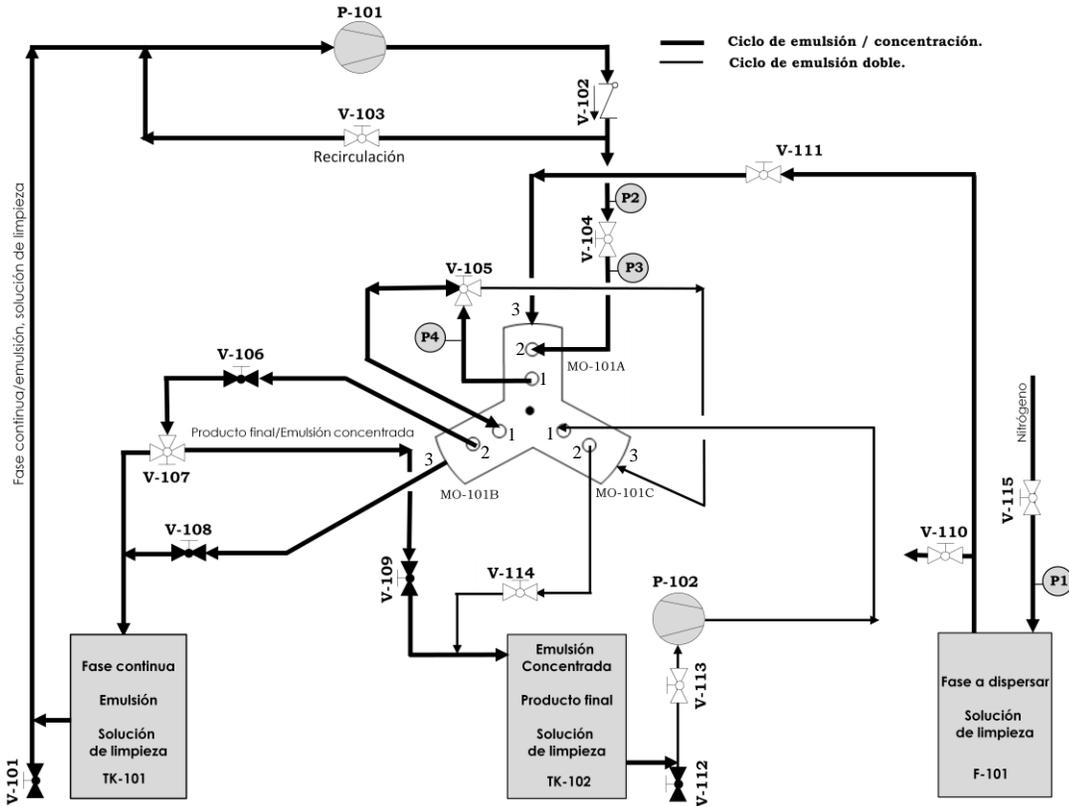


Figura N°44. Ciclo de producción de emulsión doble

El procedimiento para obtener emulsiones dobles se describe a continuación:

1. Se repiten los pasos 1 y 2 del ciclo de producción de emulsiones simples.
2. Colocar en la sección MO-101A la membrana afín a la fase continua de la emulsión interna.
3. Colocar en la sección MO-101C membrana afín de la fase continua de la emulsión externa.
4. Colocar la parte superior del módulo sobre la parte inferior del mismo y ajustar las conexiones utilizando una llave de 1/8".
5. Verificar que V-101, V-106, V-108, V-109 y V-112 se encuentren cerradas.

-
6. Verificar que V-105 tenga el sentido del flujo hacia la entrada 3 de la sección del módulo M-101C.
 7. Agregar en TK-101 la cantidad requerida de fase continua de la emulsión interna.
 8. Agregar en F-101 la cantidad requerida de la fase a dispersar de la emulsión interna.
 9. Agregar en TK-102 la cantidad requerida de fase continua de la emulsión externa.
 10. Verificar que la bomba esté conectada a la toma de corriente.
 11. Presurizar la fase a dispersar por medio de V-115.
 12. Prender la bomba P-101 y luego la bomba P-102.
 13. Regular por medio de V-103 el caudal de reciclo y monitorear P2.
 14. Manipular V-104 para fijar la diferencia de presión transmembrana requerida, y monitorear P3 y P4, para asegurarse que sean los valores de presión correctos.
 15. Chequear continuamente el nivel de F-101, TK-101, TK-102.
 16. El proceso finaliza cuando se termina el nivel de líquido de F-101.
 17. Cerrar V-115 para impedir el paso de nitrógeno a F-101.
 18. Apagar bombas.
 19. Retirar producto por medio de V-112.
 20. Si queda líquido en el tanque TK-101, retirar por medio de V-101.

(d) Ciclo de limpieza de partes porosas de las secciones MO-101A y MO-101B.

Dicho ciclo se presenta en la Figura N° 46. Se deben ejecutar los siguientes pasos:

1. Verificar que V-104 y V-108 se encuentren cerradas.
2. Verificar que V-105 tenga el sentido del flujo hacia la entrada 3 de la sección del módulo M-101B.
3. Verificar que la dirección de flujo de la válvula V-107 se encuentre hacia la descarga al tanque TK-102.
4. Agregar en F-101 suficiente cantidad de solución de limpieza.

5. Presurizar la solución de limpieza al abrir y regular V-115, la cual pasará por V-111, entrará a MO-101A por la entrada 3 y atravesará el soporte poroso correspondiente, seguidamente pasará hacia la entrada 1 de MO-101B, pasará por MO-101B1, atravesará el soporte correspondiente, saldrá hacia V-106 y V-107 hasta llegar a TK-102..
6. Monitorear el nivel de líquido de F-101.
7. Chequear la entrada de solución de limpieza “sucia” A TK-102, cuando ya no entre flujo, cerrar v-115.
8. La solución de limpieza “sucia” se drena por medio de V-112.
9. Almacenar en lugar seguro y estudiar su disposición final.

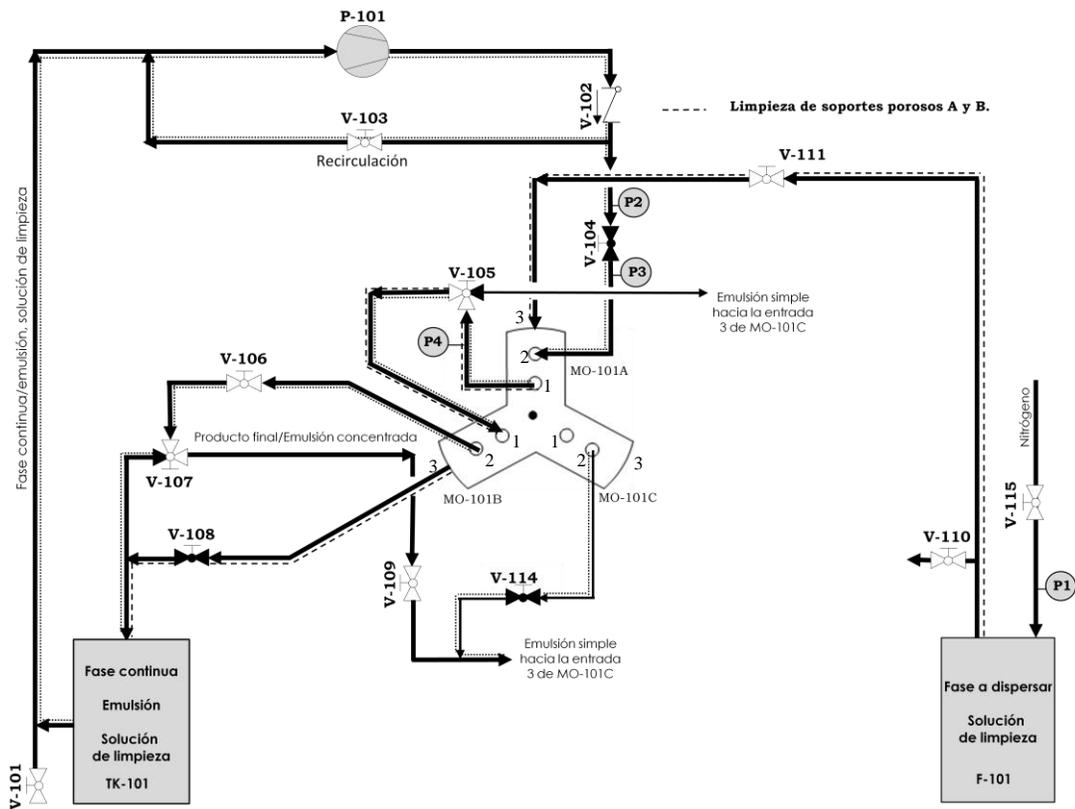


Figura N°45. Ciclo de limpieza de partes porosas de MO-101A y MO-101B

El área de flujo de cada módulo se limpiará ejecutando el mismo ciclo que el utilizado para producir emulsiones simples o dobles, sólo que esta vez, se colocará solución de limpieza y no las sustancias de formulación.

4.3. Análisis comparativo entre la planta a escala de banco (EmulMemb) y el equipo por cargas.

Luego de realizar el diseño y la construcción de la planta a escala de banco, es importante destacar las mejoras que se obtuvieron en EmulMemb con respecto al equipo por cargas, luego de identificar las variables de proceso a mejorar. El análisis comparativo se presenta como sigue:

- (a) Para obtener cuál fue el porcentaje de variación de la capacidad de EmulMemb con respecto al equipo por cargas, se calculó la cantidad de emulsión que se puede producir partiendo del hecho de que la capacidad del recipiente contenedor de fase a dispersar es de 0,4 L. Para ello se eligió la formulación N°2 reportada por Matos (2009), específicamente de tipo O/W (ya que son las que ocupan mayor volumen). Se obtuvo que de 101,5 g de emulsión que se produjeron en el equipo por cargas, ahora se pueden obtener 1601,1 g, lo cual se traduce en un incremento de la capacidad de producción de 1499,6%.
- (b) Con la configuración de equipos que presenta el equipo por cargas las emulsiones se producen por flujo directo, por otra parte EmulMemb opera a flujo cruzado, lo cual permite que la operación pueda realizarse de forma más controlada, y operar con distintas presiones tanto de fase dispersa como de fase continua.
- (c) Al incluir en EmulMemb una bomba de desplazamiento positivo de recirculación de fase continua, se tienen dos importantes avances con respecto al equipo por cargas: se puede variar la velocidad de flujo de la fase continua y es posible, para un ajuste de carrera fijado, obtener un esfuerzo de corte en la pared constante.
- (d) En el equipo por cargas era posible producir emulsiones simples mientras que con EmulMemb es posible producir emulsiones simples, dobles y simples concentradas.
- (e) El área efectiva de la membrana en el equipo por cargas es de $3,08 \text{ cm}^2$, mientras que la que corresponde a EmulMemb es de $11,15 \text{ cm}^2$, lo cual se traduce en un 72,37 % de incremento de área efectiva de la membrana.

-
- (f) Tanto en el equipo por cargas como en EmulMemb es posible utilizar membranas planas, sin embargo, debido a que EmulMem tiene definidas la línea de entrada de la fase a dispersar y las de entrada y salida de la fase continua, de acuerdo a la configuración de flujo cruzado, entonces es posible, realizando ajustes de conexiones, emplear membranas tubulares, preferiblemente colocando la bomba Speck® en el ciclo de fase continua, ya que generará mayor régimen turbulento, o utilizando grupos de tubos membranas tubulares con diámetro muy pequeño.
 - (g) La presión máxima de fase a dispersar que se puede aplicar, en ambos casos es de 10 bar, ya que no se realizaron variaciones en el sistema correspondiente al área de fase a dispersar.
 - (h) EmulMemb ocupa 1,3 m² de área y el equipo por cargas 0,27 m². Es importante destacar una planta a escala de banco debe ocupar un máximo de 1m², que la diferencia se puede disminuir si se cambia el recipiente contenedor de fase a dispersar por otro que ocupe un menor espacio, lo cual en el caso de EmulMemb no se pudo realizar por la disponibilidad del equipo nombrado.
 - (i) EmulMemb ofrece la posibilidad de variar la presión transmembrana en un amplio rango, ya que permite variar la presión del flujo de fase continua a presiones mayores que 1 atm, la cual era la máxima presión de fase a dispersar que se podía aplicar en el equipo por cargas.

4.4. Análisis comparativo entre EmulMemb y los sistemas descritos en el Capítulo I.

Luego de realizar el diseño y construcción de la planta a escala de banco con operación semicontinua para producir emulsiones empleando membranas (EmulMemb), se contrastará su configuración de equipos, funcionamiento y características más resaltantes con las de las plantas utilizadas en investigaciones previas definidas en los antecedentes del presente Trabajo Especial de Grado, las cuales involucran distintos ciclos y equipos que contribuyen, unos en mayor grado

que en otros, pero que conllevan al mismo objetivo producir emulsiones con membranas.

En la Tabla N°16, se contrastan sus principales características.

Tabla N°16. Análisis comparativo entre plantas reportadas en los antecedentes y EmulMemb

Autor / Parámetro o variable	Williams et. al. (1998)	Joscelyne y Trägård (1999)	Vladisavjevic et. al. (2000)	EmulMemb (2010)
Sistema empleado	Flujo cruzado	Flujo cruzado	Flujo cruzado	Flujo cruzado
Fase continua	Bombeada	Bombeada	Bombeada	Bombeada
Capacidad tanque de fase continua (L)	10	2	NR	8
Tanque de fase continua con agitador	Sí	No	No	No
Tanque de fase continua con medidor de tamaño de gota	Sí, posee el dispositivo FBRM Lasentec USA	No	No	No
Tanque de fase continua con cintas de calentamiento	Sí	No	No	No
Tipo de bomba que impulsa la fase continua	De lóbulo rotatorio	De engranajes (IWAKI-MGD-M15)	De engranajes (Multifix, MEL 3000)	De diafragma
Capacidad de la bomba (L/h)	90-500		130	15,14 L/h
Intercambiador de calor	Sí, en el ciclo de emulsión simple	Sí	Si	No
Fase a dispersar	Presurizada	Presurizada con nitrógeno	Presurizada con aire comprimido	Presurizada con Nitrógeno
Válvula reguladora de presión de gas	Sí, además posee válvula de seguridad.	No	No	Si
Capacidad tanque de fase a dispersar (L)	5	No reporta	No reporta	0,4
Presión del tanque de fase a dispersar (bar)	7	No reporta	No reporta	10
Tanque de fase a dispersar con cintas de calentamiento	Sí, posee cintas de calentamiento	No	No	Si, posee una chaqueta por la cual se puede calentar o enfriar el contenido del tanque.

Tabla N°16. Análisis comparativo entre plantas reportadas en los antecedentes y EmulMemb (continuación)

Autor / Parámetro o variable	Williams et. al. (1998)	Joscelyne y Trägård (1999)	Vladisavjevic et. al. (2000)	EmulMemb (2010)
Agitador en el tanque de producto final	Sí	No	No	No
Tipo de membranas	Tubulares de cerámica, acero inoxidable y materiales poliméricos	Tubulares de α -alúmina y cubiertas de zirconio	Fibras huecas microporosas hechas con polipropileno	Planas
Módulo	Tubular, de flujo cruzado	Módulo monotubular de Membralox®	Módulo Microdyn, alberga 40 membranas	Triple: alberga tres membranas
Área efectiva(m ²)	0,1 y 3	0,0055	0,1	0,001 (de una sección)
Longitud del módulo (m)	0,6	0,25	0,47	0,20
Transmisores de presión	Posee dos transmisores de presión, uno a la entrada y otro a la salida del módulo	No	No	No
Indicadores de presión	No	En la salida del módulo y en la entrada de la fase a dispersar en el tanque.	Posee tres, dos en las líneas de entrada y otro a la salida del módulo	Sí, a la entrada y salida del módulo, y en la salida del recipiente contenedor de la fase a dispersar.
Indicadores de temperatura	Todos los sistemas tienen medidores de temperatura	Si, posee termocuplas en el módulo y en el tanque de producto final	No	No posee medidor de temperatura
Medidores de flujo	Posee medidores de flujo en el tanque de fase continua e indicadores de nivel	No	No	No
Ciclo de emulsión simple	Sí	Sí	Sí	Sí
Ciclo de emulsión concentrada	No	No	No	Si

Tabla N°16. Análisis comparativo entre plantas reportadas en los antecedentes y EmulMemb (Continuación)

Autor Parámetro o variable	Williams et. al. (1998)	Joscelyne y Trägård (1999)	Vladisavjevic et. al. (2000)	EmulMemb (2010)
Ciclo de emulsión doble	No	No	No	Si
Válvulas toma muestras	Sí, justo después del tanque de almacenamiento y justo antes de la entrada al tanque.	No	No	Sí, justo después del tanque de almacenamiento.
Panel de control	Sí, el cual dependiendo de las señales de los transmisores de presión, de flujo y temperatura, controlan la velocidad de la bomba.	No	No	

Partiendo del contenido de la tabla anterior y de la revisión de los antecedentes presentados en el Capítulo I del presente Trabajo Especial de Grado se describirán las analogías, así como también las diferencias entre EcoMem y las plantas empleadas en dichas investigaciones. Para un mejor entendimiento de lo que se expondrá a continuación ver la Figura N°1, Figura N°2 y Figura N°3 del Capítulo I.

A continuación se describen las analogías:

- (a) En general, todas las plantas tienen un sistema para la circulación de fase continua y otro sistema para la circulación de la de fase a dispersar.
- (b) La fase a dispersar es presurizada con nitrógeno o aire comprimido, dependiendo de la planta.
- (c) Las bombas utilizadas en los ciclos de fase continua a pesar de que son de distintos tipos, todas son reciprocantes.

- (d) Adicional al tanque de almacenamiento de fase continua y al tanque de almacenamiento de la fase a dispersar, se dispone también de un tanque de almacenamiento para el producto final, tal como lo presenta Williams et. al. (1998).
- (e) En general, todas las plantas tienen un sistema para la circulación de fase continua y otro sistema para la circulación de la de fase a dispersar.
- (f) La fase a dispersar es presurizada con nitrógeno o aire comprimido, dependiendo de la planta
- (g) Las bombas utilizadas en los ciclos de fase continua a pesar de que son de distintos tipos, todas son reciprocantes.
- (h) Adicional al tanque de almacenamiento de fase continua y al tanque de almacenamiento de la fase a dispersar, se dispone también de un tanque de almacenamiento para el producto final, tal como lo presenta Williams et. al. (1998).
- (i) Sólo dos plantas cuentan con un sistema de calentamiento integrado al tanque presurizado de fase a dispersar EmulMemb y el sistema de Williams et. al. 1998 (posee cintas de calentamiento), Emulmemb en este caso tiene mayor ventaja pues la chaqueta puede enfriar o calentar el contenido del tanque dependiendo de la temperatura de líquido que se haga circular a través de ésta..
- (j) En todos los sistemas se mantiene monitoreada la presión de salida de la fase continua/emulsión y la presión de fase a dispersar, a través de los transmisores/indicadores de presión ubicados en los puntos de interés,, así como también en la entrada del módulo, éste último con excepción del sistema de Vladisavjlevic et. al. (2000).
- (k) EmulMemb también posee una válvula reguladora de la presión de nitrógeno aplicada a la fase a dispersar

Seguidamente se tienen las diferencias:

- (a) El módulo de membranas es tubular en todos los casos, a excepción del módulo de EmulMemb, el cual es plano, sin embargo, es posible realizar

modificaciones para operar con membranas tubulares, si se mantienen las conexiones de entrada y salida al módulo, se podría adaptar un módulo de membranas tubular (de acuerdo a la disponibilidad de recursos).

- (b) El área efectiva de las membranas de EmulMemb es mucho menor al área presentada por los demás sistemas, lo que se puede traducir en un incremento del tiempo en la operación en comparación con los tiempos que pudieran obtener las demás plantas.
- (c) Los tanques de almacenamiento tanto de fase continua como de producto final no poseen agitadores como en el caso de la planta piloto de Williams et. al. (1998).
- (d) EmulMemb no posee sistema de control automático de flujo, para controlar el flujo de fase continua que entra al módulo.
- (e) Con respecto al control de temperatura, EmulMemb no posee transmisores de temperatura en los tanques de fase continua y fase dispersa, tales como los que tiene integrado el equipo de Williams et al (1998), ni tampoco posee termocuplas en el módulo de la membrana Joscelyne y Trägård, (1999).
- (f) El ciclo de fase continua de Emulmemb no posee un intercambiador de calor como es el caso.
- (g) EmulMemb posee una capacidad cercana a la mayor de todos los sistemas reflejados en la Tabla N°16.
- (h) A diferencia de las demás plantas, EmulMemb cuenta con una válvula reductora de presión en la línea de entrada de la fase continua.
- (i) La fase a dispersar puede ser presurizada de hasta 10 bar y la máxima presión de la fase continua es de 17,23 bar-140 bar. Por lo que existe un amplio intervalo de presiones transmembranas.
- (j) Las membranas disponibles para el caso en estudio son planas, cuyos materiales de fabricación son politetrafluoroetileno (PTFE), fluoruro de polivinilideno (PVDF) y poliéter sulfona, el módulo es el adecuado para este tipo de membranas (planas) y el tamaño de poro varía entre 0,2 y 0,22 μm ., sin

embargo se deben adquirir membranas en forma de hoja para recortar a la medida del soporte del módulo.,

- (k)** Las dimensiones, específicamente en longitud, el módulo de EmulMemb es el más pequeño.

CONCLUSIONES

- Se diseñó y construyó una planta a escala de banco con operación semicontinua para emulsionar con membranas a flujo cruzado, la cual es la primera (de las que se han reportado en la bibliografía) que tendrá cuatro ciclos de operación; emulsión simple, emulsión concentrada, emulsión doble y el ciclo de limpieza.
- En el proceso es posible controlar el esfuerzo de corte en la membrana, lo cual se logró mediante la integración de una bomba de desplazamiento positivo al ciclo de fase continua.
- El módulo utilizado proporciona un buen soporte a la membrana y además por su configuración permite que se lleve cabo la operación a flujo cruzado para así poder operar a distintas velocidades de fase continua.
- En el sistema no sólo se pueden variar las velocidades de la fase continua sino que adicionalmente se incorporó una válvula de regulación de presión que permite tener control sobre esta variable tan importante en el desempeño del equipo.
- Se amplió el intervalo de presión transmembrana, de 1,5 bar que se tenía el proceso por cargas a 10 bar en el equipo semicontinuo.
- Se incrementó la capacidad de producción de emulsiones en un 1499,6% y el área efectiva de la membrana en un 72,37%.
- Con los cambios implementados será posible variar el caudal de la fase continua de 0,4 gph hasta 4 gph, lo cual permitirá estudiar un amplio intervalo de velocidades de fase continua en el proceso en flujo cruzado.
- Es posible utilizar tanto la bomba Speck® como la bomba JR Madden® en el ciclo de fase continua, ya que pueden superar las pérdidas de energía en el sistema, la operación con la bomba Speck® debe ser manejada con mucho cuidado ya que todos los equipos en el sistema no soportan la máxima presión de descarga de la misma.
- Se pueden utilizar formulaciones variadas debido al material de diseño empleado en todos los equipos involucrados en la planta.

- Se obtuvieron los diagramas de proceso: diagrama de bloque de proceso, diagrama de flujo de proceso y diagrama de tuberías e instrumentación, así como también las hojas de especificación de cada equipo.
- Se generó el plano en tres dimensiones de la planta, en el cual se definió la ubicación real de los equipos, el recorrido de las tuberías, su longitud y la ubicación de válvulas en el panel, dicho plano fue una herramienta fundamental en el desarrollo de la construcción de la planta.
- La prueba de fugas realizada en el equipo fue exitosa, no se observaron fugas.

RECOMENDACIONES

- Colocar medidores y alarmas de nivel en los tanques TK-101 y TK-102.
- Colocar cintas o chaquetas de calentamiento en los tanques TK-101 y TK-102, que permitan realizar la disolución de surfactantes directamente en el sistema y no en un equipo aparte.
- Colocar agitadores en los tanques TK-101 y TK-102, para
- Colocar tapas a dichos tanques para evitar la evaporación y contaminación de los componentes de la emulsión.
- Colocar una válvula que permite la desviación del fluido hacia la entrada 3 de la sección MO-101A para que sea posible pasar la solución de limpieza continuamente a través de las partes porosas de MO-101A y MO-101B.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilera, J. M. y Lillford, P. (2008) Food Materials Science, 2^{da} edición. New York: Springer New York. 603 p.
- Charcosset, C. (2009). Preparation of emulsions and particle by membrane emulsification for the food processing industry. Journal of Food Engineering (92), 241-249.
- Chattopadhyay A.K. y Mittal K.L (1996). Surfactants in Solution. Vol. 64., MARCEL DEKKER, 415p. Estados Unidos.
- Couper J.R., Penney W. R., Fair J.R., Walas S.M. (2005). Chemical Process Equipment, Selection and Design. 2^{da} Edición. Editorial Elsevier.833p.
- Crane (1988) Flujo de Fluidos en Válvulas Accesorios y Tuberías. Editorial Mc Graw Hill. 215p.
- Creus, A. (2005). Instrumentación industrial. 7^a edición. Editorial Marcombo. 775p.
- García A. (2002). El Documento de Proyecto de Ingeniería. Trabajo publicado por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes , Universidad Politécnica de Madrid, España. 48p.
- Gerbino P.P. (2005). The Science and Practice of Pharmacy. Edición 21. Editorial Lippincott Williams and Wilkins. Estados Unidos. 2393p.
- Gkn Sinter Metals, Membranas metálicas Sika R..AS.
- Gómez-Senent E., Gómez-Senent D., Aragonés P., Sánchez M.A. y López D. (1997). Cuadernos de Ingeniería de Proyectos I. Universidad Politécnica de Valencia, España. 270p.
- Henry J.G.y Heinke G.W.(1999). Ingeniería Ambiental, 2^{da} Edición, México. 778 pág.
- Jiuwu Hitech® productos. Consultado el 26 de Febrero de 2010 en: <http://www.jiuwu.com/en/product.aspx?type=5>
- Joscelyne, S., y Trägårdh, G. (2000). Membrane Emulsification. A literature review. Journal of Membrane Science (169), 107-117.

- Joscelyne, S., y Trägårdh G. (1999). Food emulsions using membrane emulsification: conditions for producing small droplets. *Journal of Food Engineering* 39 59-64
- Lambrich U.y Schubert H. (2005) Emulsification using microporous systems. *Journal of Membrane Science* 257 , 76–84.
- Lowenstein, J. G. (1985).The Pilot Plant. *Chemical Engineering* 9/23, Vol 92 N°25 62-76
- Mycrocin Nadir® (S/A). *Advanced Separation Technology. The Art to Clean Solution.* 32p.
- Méndez M.V. (2007). *Tuberías a Presión en los Sistemas de Abastecimiento de Agua.* Universidad Católica Andrés Bello. Caracas, Venezuela.
- Miranda, J.J (2004). *El desafío de la Gerencia de Proyectos.* Editores MM. Colombia. 284p.
- Mott R.L., (2006). *Mecanica de Fluidos.* Sexta Edición. Editorial Prentice Hall. México. 623p.
- PDVSA (1993). *Manual de Ingeniería de Diseño.* Vol. 13-III. N° 90616.1.024. Guía de Ingeniería. Dimensionamiento de Tuberías de Proceso.
- PDVSA (1994). *Manual de Ingeniería de Diseño.* Vol. 13-III. N° 90617.1.040. Guía de Ingeniería. Selección de válvulas.
- PDVSA (1997a). *Manual de Diseño de Proceso .* N° MDP-02-P-05. Bombas. Tipos de bombas.
- PDVSA (1997b). *Manual de Diseño de Proceso .* N° MDP-02-P-04. Bombas. NPSH.
- PDVSA (1997c). *Manual de Diseño de Proceso .* N° MDP-02-P-06. Bombas. Cálculos en servicios de bombeo.
- Peng y Williams (1998). *Controlled Production of Emulsions Using a Crossflow Membrane. Part I: Droplet Formation from a Single Pore.* *Trans IChemE*, Vol 76, Part A.
- Rayner, R. (1995). *Pump Users Handbook.* 4^{ta} Edición 428p.

- Rayner M. y Trägårdh G. (2005). Membrane Emulsification Modelling how we can get from characterisation to design?. *Desalination* 145, 165-172.
- Rivas H.y Guriérrez X. (1999). Los surfactantes: comportamiento Y algunas de sus aplicaciones en la industria petrolera. *Acta Científica Venezolana*, Vol. 50, Suplemento No. 1,
- Salager, J.L. (1993). Surfactantes en solución acuosa. Cuaderno FIRP 201 A, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Salager, J.L. (1999a). Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte A. Introducción y conceptos de Formulación Físico-Química. Cuaderno FIRP S747 A, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes., Mérida, Venezuela.
- Salager, J.L. (1999b). Formulación, Composición y Fabricación de emulsiones para Obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte B. Propiedades de las Emulsiones y su Medición. Cuaderno FIRP S747 B, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Salager, J.L., y Antón, R. (1998). HLB, PIT y R de Winsor. Cuaderno FIRP S210A, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Salager, J.L. (1993). Surfactantes en solución acuosa. Cuaderno FIRP 201 A, Laboratorio FIRP. Escuela de Ingeniería Química, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Schramm, L. (2005). Emulsions, foams and suspensions. WILEY-VCH. 448 p.
- Sinnott, R.K. , Coulson J.M. Ricgardson J.F. (2005) *Chemical Engineering Design*. Vol. 6. Elsevier Butterworth Heinemann
- Smith C. y Corripio A (2006). *Control Automático de Procesos*. Editorial Limusa. 717p.
- Speck, (2004). *Pumps and Accesories Catalogue*. SPECKS pumps.
- Speck (s.f.). *Documentación Técnica Bombas de Alta Presión*.

- Swagelok (s.f) Valve Sizing Technical Bulletin.
- Viejo M. y Álvarez J. (2003). Bombas: Teoría, diseño y aplicaciones. 3ª Edición. Editorial Limusa. México. 239p.
- Vladisavljević G.T., Tesch S. y Shubert H. (2002). Preparation of water-in-oil emulsions using microporous polypropylene hollow fibers: influence of some operating parameters on droplet size distribution. *Chemical Engineering and processing* 4, 231-238
- VEPICA (s.f.). Fases de la Ingeniería de Proyectos.
- Vladisavljević G.T. y Shubert H. (2003). Influence of process parameters on droplet size distribution in SPG membrane emulsification and stability of prepared emulsion droplets. *Journal of Membrane Science* 225, 15–23.
- Vladisavljević G.T., Brösel S., y Schubert H. (2000) Preparation of Water-in-Oil Emulsions Using Microporous Polypropylene Hollow Fibres: Conditions for Producing Small Uniform Droplets. *Chemical Papers* 54(6a), 383-388
- Wang L.K., Hung Y.T. y Shamma N.K. (2006) *Advanced Physicochemical Treatment Processes*. Humana Press Inc, New Jersey. 679p.
- Williams R. A. , PENG S. J., Wheeler D. A., Morley N. C., Taylor d., Whalley M. Y Houldsworth D. W., (1998). Controlled production of emulsions using a crossflow membrane Part II: Industrial Scale Manufacture R. *Trans IChemE*, Vol 76, Part A.

APÉNDICES

APÉNDICE I: Factores de fricción para cualquier tipo de tubería comercial

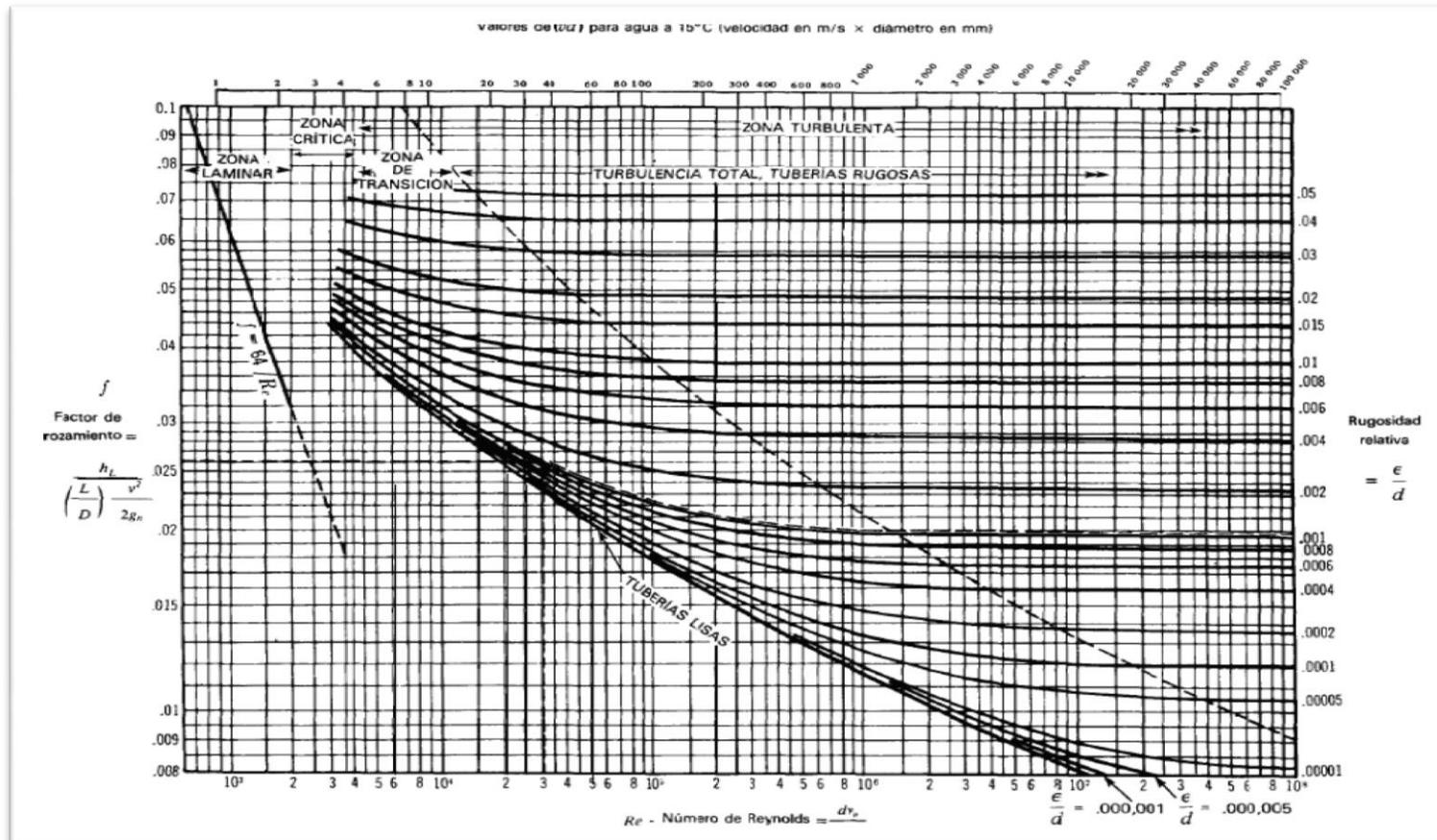


Figura N°46. Diagrama de Moody. (Crane, 1988.)

APÉNDICE II: Descripción del equipo por cargas para la producción de emulsiones con membranas

El equipo para producir emulsiones con membranas ubicado en el Laboratorio de separaciones mecánicas (Figura N°27) está conformado por los siguientes elementos:

- Un (1) reductor de presión (V1)
- Una (1) válvula de tres (3) vías. (V2)
- Cinco (5) rotámetros.
- Dos (2) manómetros, para medir presiones de (0-1000)mbar y de (0-10)bar.
- Un (1) recipiente a Presión con tapa (Celda).
- Soporte de membrana (SM)
- Soporte de metal, en el que se encuentran acoplados los accesorios y equipos nombrados anteriormente.

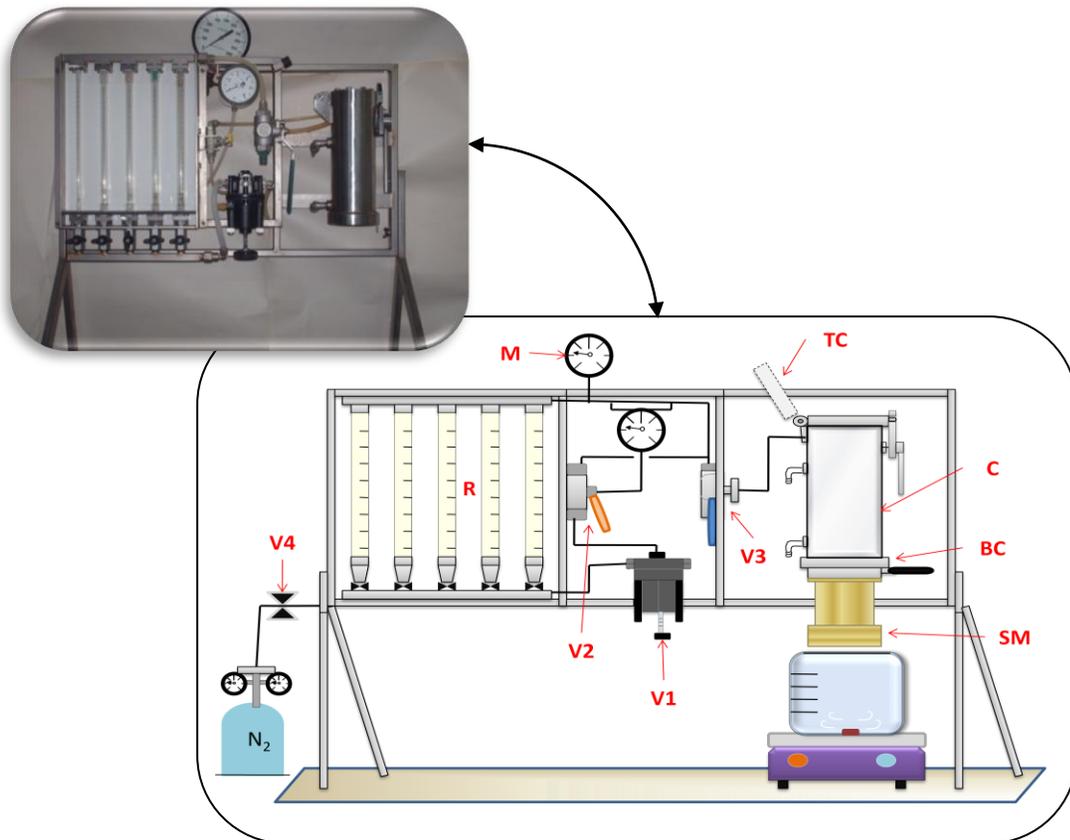


Figura N°47 . Filtratest (Matos, 2009)

Los elementos de la celda presurizada se presentan a continuación en la Figura N° 28.

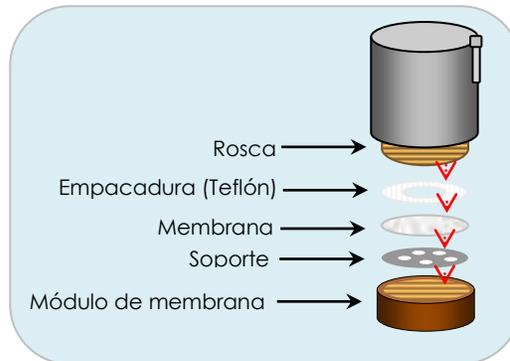


Figura N°48. Elementos de la celda.

APÉNDICE III: Características de surfactantes a utilizar



OXITENO Nombre del Producto: **ALKEST SP 80** (Oxiten, 2003a)

Estado Físico: líquido amarillento claro
 Punto de inflamación: $>175^{\circ}$
 Presión de Vapor A $20^{\circ}\text{C} < 0.0013\text{kPa}$
 Densidad del Vapor: en relación al aire: no relevante
 Densidad: a 25°C 1000Kg/m^3 aproximadamente.
 Solubilidad: insoluble en agua.
 Viscosidad: a 25°C 1100mPa.s



OXITENO

Nombre del Producto: **ALKOPON NS** (Lauril sulfato de Sodio) (Oxiten, 2003b)

Aspecto físico: Líquido claro
 pH: en solución acuosa al 1% y a 25°C de 8 a 9.
 Punto de fusión 15°C comenzando la turbidez
 Presión de Vapor A $25^{\circ}\text{C} < 2.3\text{kPa}$
 Densidad del Vapor: en relación al aire: no relevante
 Densidad: a 20°C 1100Kg/m^3
 Solubilidad: a temperatura ambiente completamente soluble en agua.
 Viscosidad: a 25°C 100mPa.s



Nombre del Producto: **Arkopal N. NFE4**

Estado físico: líquido viscoso ligeramente amarillo.
 Solubilidad: Insoluble en agua
 Punto de Enturbiamiento: 36°C a 38°C (En una solución al 5% de butilenglicol) (Hoechst, s.f.).

**Nombre del Producto: Arkopal N. NFE6**

Estado físico: líquido viscoso ligeramente amarillo.

Solubilidad: A 25°C soluble en agua, formando soluciones turbias.

Punto de Enturbiamiento: 61°C a 63°C (En una solución de butilinglicol). (Hoechst, s.f.).

**Nombre del Producto: Arkopal N. NFE10**

Estado físico: líquido viscoso ligeramente amarillo.

Solubilidad en agua: A 25°C soluble en agua, formando soluciones claras.

Solubilidad en butildiglicol de 62°C a 65°C

Punto de enturbiamiento: 62 a 65°C (En agua) (Hoechst, s.f.).

**Nombre del Producto: Arkopal N. NFE15**

Marca:HOECHST

Estado físico: pasta ligeramente amarilla

Solubilidad: A 25°C soluble en agua, formando soluciones claras.

Punto de Enturbiamiento: 92 a 95°C (En agua) ; 61 a 63°C (en una solución de cloruro de sodio) (Hoechst, s.f.).

APÉNDICE IV: Simbología de diagramas (DTI y DFP)

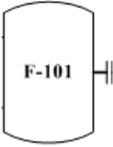
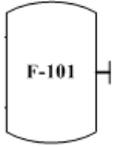
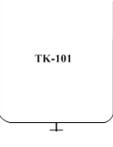
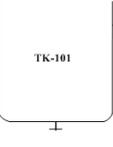
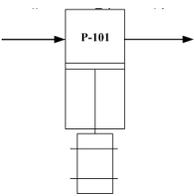
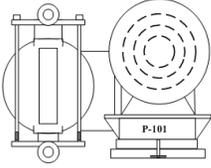
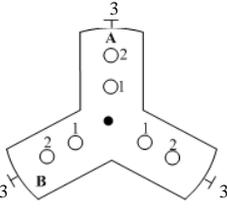
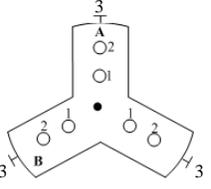
DFP		DTI
	<p>Recipiente contenedor de fase a dispersar</p>	
	<p>Recipiente contenedor de fase continua (TK-101=TK102)</p>	
	<p>Bomba de diafragma (P-101=P-102)</p>	
	<p>Módulo de membranas (MO-101) Figura N°. Simbología de equipos</p>	

Figura N°49. Simbología de cada equipo de acuerdo al diagrama (DFP o DTI).

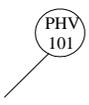
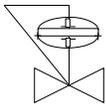
Diagrama	Símbolo	Descripción	Símbolo	Descripción
DFP		Válvula de bola de tres vías		Indicador de control de presión
		Válvula de bola de dos vías		
		Identificador de línea		Válvula de regulación
		Válvula antirretorno		Drenaje cerrado
DTI		Reductor		Indicador del tipo de válvula (de presión de control manual)
		Manómetro o indicador de presión		
		Válvula de bola de tres vías		Válvula de regulación de presión con toma interna
		Válvula de bola de dos vías		
		Válvula antirretorno		Válvula de aguja

Figura N°50.: Simbología de válvulas e instrumentos

APÉNDICE V: Cotizaciones

Swagelok

VENEZUELA FLUID SYSTEM TECHNOLOGIES, C.A.
 RIF: J-31429540-3 NIT: 0471772607
COTIZACIÓN Nº VFST-UCV-0064
 REQ. S/N

31 de mayo de 2010

Señores
 UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA - UCV
 Ciudad

Atn.: Prof. Anubis Perez

Por medio de la presente les cotizamos el suministro del siguiente material:

POB	CANT	DESCRIPCION	P/UNIT Bs.	P/TOTAL Bs.	TIEMPOS ENTREGA
01	02	VALVULA DE BOLA (2 VIAS), 1/4" OD, 88316, SWAGelok, MODELO 88-42G84	610.20	1.220.40	4 SEMANAS
02	01	VALVULA CHECK, 1/8" OD, PRESION DE DISPARO 1 PSI, 88316, SWAGelok, MODELO 88-20-1	462.50	462.50	INMEDIATO
03	07	VALVULA DE BOLA (2 VIAS), 1/8" OD, 88316, SWAGelok, MODELO 88-41G82	630.80	4.415.60	3 PZS INMEDIATO
04	01	REGULADOR DE PRESION, 88316, 0-250 PSI, 1/4" NPT, MANOMETRO A LA ENTRADA Y A LA SALIDA, Cv: 0.02, SWAGelok, MODELO KPR10RF411A20020	3.702.20	3.702.20	8 SEMANAS
05	02	VALVULA DE BOLA (3 VIAS), 1/8" OD, 88316, SWAGelok, MODELO 88-41GX82	745.20	1.490.40	INMEDIATO
06	02	TEE 1/4" OD, 88316, SWAGelok, MODELO 88-400-3	179.50	359.00	INMEDIATO
07	02	REDUCTOR 1/8" OD X 1/4" OD, SWAGelok, MODELO 88-200-R-4	73.50	147.00	INMEDIATO
08	03	TEE 1/8" OD, 88316, SWAGelok, MODELO 88-200-3	194.40	583.20	INMEDIATO
09	02	TEE 1/4" OD, 88316, SWAGelok, MODELO 88-400-3	179.50	359.00	INMEDIATO
10	04	CONECTOR HEMBRA 1/4" OD X 1/4" NPT, 88316, SWAGelok, MODELO 88-400-7-4	92.90	371.60	INMEDIATO
11	01	CONECTOR MACHO 1/8" OD X 1/4" NPTM, 88316, SWAGelok, MODELO 88-200-1-4	67.00	67.00	INMEDIATO

Av. Rómulo Gallegos con Calle Chacao, Sdf. 10, Piso 1, Oficinas 1 y 2, Urb. Horizonta, Caracas 1071, Venezuela
 Teléfono: (58 212) 237 1026 / 237 0526 / 235 5564 / 232 3223 - Fax: (58 212) 235 5346
 e-mail: ventas@venezuela.swagelok.com / website: www.swagelok.com/venezuela

Swagelok

VENEZUELA FLUID SYSTEM TECHNOLOGIES, C.A.

12	01	CONECTOR MACHO 1/4" OD X 1/4" NPTM, 88316, SWAGelok, MODELO 88-400-1-4	57.50	57.50	INMEDIATO
13	01	TEE CORRIDA 1/8" OD X 1/8" OD X 1/8" NPT, 88316, SWAGelok, 88-200-3TTF	240.90	240.90	INMEDIATO
14	01	MANOMETRO 1 1/2" DIAL, 0-16 BAR, CONEXION INFERIOR, 1/8" NPTM, SIN GLICERINA, SWAGelok, MODELO PGH40M-BG16-LANX	675.20	675.20	5 SEMANAS
15	02	ANILLO 1/4" NPT	75.00	150.00	INMEDIATO
16	01	UNION 12MM OD X 1/4" OD, SWAGelok, MODELO 88-12M0-6-4	194.40	194.40	4 SEMANAS
17	01	REDUCTOR 1/8" OD X 1/4" OD, SWAGelok, MODELO 88-200-R-4	73.50	73.50	INMEDIATO
19	01	TEFLON 1/4", SWAGelok	22.70	22.70	INMEDIATO

SUB-TOTAL	14.992.10
IVA (12%)	1.751.05
TOTAL (Bs)	16.743.15

Este cotización NO tiene incluido el IVA

• UNA VEZ COLOCADA LA ORDEN NO SERA ACEPTADA SU ANULACIÓN, DEVOLUCION O CAMBIO.

VALIDEZ DE LA OFERTA : 15 días
 TIEMPO DE ENTREGA : El indicado en la columna 5, una vez recibida la O/C
 LUGAR DE ENTREGA : Sus oficinas en Caracas
 FORMA DE PAGO : Contado, contra entrega de los materiales
 CUENTA CORRIENTE : BBVA Banco Provincial Nº 0108 0017 01 0100135356
 Banco Mercantil Nº 0105 0018 45 1018572252

Esperando que la presente sea de su aceptación, quedamos de ustedes

Muy atentamente,

 Leonardo Montes Rodríguez

e-mail: ventas@venezuela.swagelok.com / website: www.swagelok.com/venezuela

Figura N°51. Cotización de Swagelok

REFERENCIA	DENOMINACIÓN	UND	PRECIO	%DTO	IMPORTE
Partida 1	Partida 1				
002	Bomba magnetica MDG R15T K220	1,00	1.683,00		1.683,00
002	Bomba magnetica MDG R15P C220	1,00	1.657,20		1.657,20
	Total Partida 1				<u>3.340,20</u>
TOTAL PRESUPUESTO					3.340,20EUR
CONDICIONES GENERALES					
IVA (18%):	No incluido				
PLAZO ENTREGA:	2 a 3 semanas, a partir confirmación pedido.				
FORMA PAGO:	Transf. 50% pedido, 50% a la entrega				
VALIDEZ OFERTA:	10 días, a partir fecha presente.				
OBSERVACIONES:	Transporte NO incluido				

Figura N°52. Cotización de Jehsl

APÉNDICE VI: Procedimiento para curva de calibración de la bomba P-101

Para ejecutar la calibración de la bomba se procedió a realizar un montaje con un recipiente de aproximadamente 2 L de capacidad, y dos líneas de 3/8" diámetro con longitud de 1,19 m en la succión y 1,60 m en la descarga, la altura del tanque de succión fue de 0,60 m. Así como también tres cilindros graduados de 100 mL, 250 mL y 500 mL. El procedimiento fue el siguiente:

- Se realizaron las conexiones de las líneas de descarga y de succión en la bomba utilizando teflón, y la conexión del
- tanque utilizando teflón y una empacadura para evitar fugas.
- Se llenó el recipiente con aproximadamente 1,8 L de agua y se colocó la línea de descarga de la bomba dentro del cilindro graduado de 100 mL. La presión del recipiente de succión de la bomba es igual a 1 atm.
- Se realizó el arranque de la bomba con un ajuste de carrera igual a 2 y se anotó el tiempo que el flujo de agua llenaba el cilindro cada diez mililitros.

De forma análoga se realizó el procedimiento anterior para los ajustes de 3,5 (utilizando el cilindro graduado de 250 mL), de 5 (utilizando el cilindro graduado de 250 mL), de 8 y 10 para lo cual se empleó el cilindro graduado de 500 mL, esto, motivado al incremento del caudal con el ajuste de la carrera.

APÉNDICE VII: Coeficiente de resistencia K, longitud equivalente L/D y coeficiente de flujo

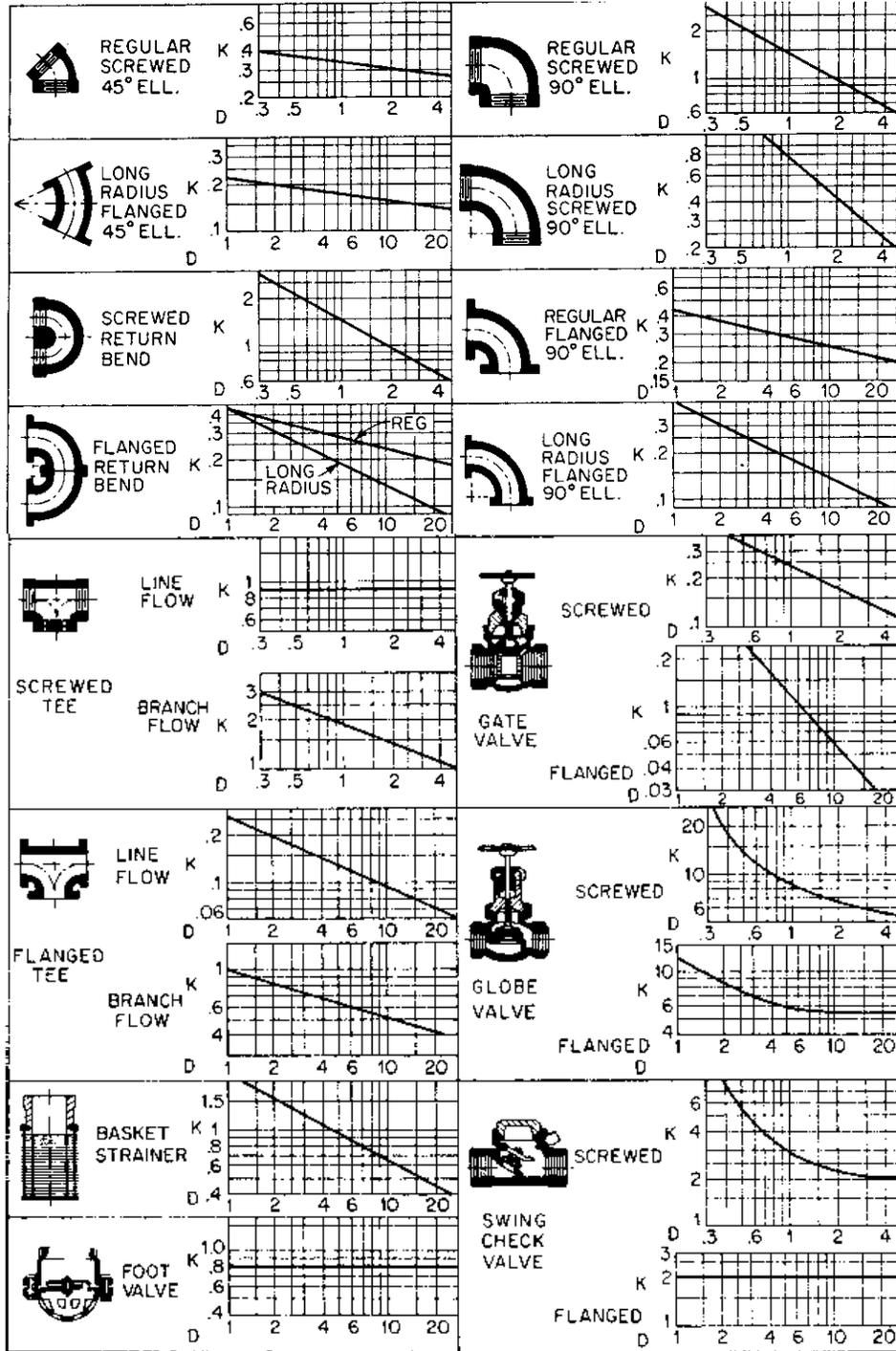


Figura N°53. Coeficiente de resistencia para válvulas y accesorios (Crane, 1988)

APÉNDICE VIII: Cuadro de resistencia química de la bomba P-101

**Madden Manufacturing, Inc.
Chemical Resistance Chart**

Ratings, chemical effect A. no effect, excellent B. minor effect, good C. moderate effect, fair D. extreme effect, not recommended

CHEMICAL	PVC	Poly-propylene	PTFE	Viton	Buna	Neo-prene	Hypalon	Cast Iron	316 SS	Alloy 20	Hastelloy C	Ceramic	Double Diaphragm
Acetic acid-<20%	D	A	A	B	B	A	A	C	A	A	A	A	YES
Alcohol, methyl	A	A	A	B	A	A	A	A	A	A	A	A	-
Alums	A	A	A	A	A	A	-	-	A	A	B	-	YES
Aluminum sulfate	A	A	A	A	A	A	A	D	B	B	B	A	-
Amines	D	-	A	D	D	B	D	D	A	B	C	A	-
Ammonium hydroxide	A	A	A	B	D	A	A	A	A	A	B	A	YES
Boiler chemicals-phosphate	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	-
Boiler chemicals-sulfite	A	A	A	A	A	A	B	A	A	A	A	A	-
Benzene	C	C	A	A	D	D	D	A	B	A	B	A	-
Caustic soda (NaOH) See sodium hydroxide													
Chlorinated water	A	C	A	A	D	D	C	-	C	B	A	-	YES
Chlorine, liquid	C	B	A	A	D	D	C	C	C	C	B	D	YES
Citric acid	B	A	A	A	A	A	A	D	A	A	A	A	YES
Cyanide (sodium cyanide solution)	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	-
Deionized water	A	A	A	A	A	A	A	D	A	A	A	A	-
Diatomaceous earth	D	D	D	C	B	A	A	B	A	A	A	B	-
Ethylene dichloride	D	C	A	A	D	D	D	A	A	A	B	C	-
Ethylene glycol	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	-
Ethylene oxide	C	C	A	D	D	D	D	D	C	A	-	A	YES
Fabric dye solution	B	B	A	A	-	C	-	-	A	A	A	-	-
Ferric chloride	A	B	A	A	A	B	B	D	C	D	B	A	YES
Ferric sulfate	A	B	A	A	A	A	A	D	A	A	A	A	-
Ferrous chloride	A	A	A	A	A	A	A	D	C	C	B	A	YES
Ferrous sulfate	A	A	A	-	A	-	-	D	B	B	B	A	-
Fertilizer-nitrogen	-	-	A	-	-	A	-	-	A	-	-	-	-
Formaldehyde-40%	A	A	A	A	B	B	-	B	A	A	B	A	-
Hydrazine	-	C	C	A	B	B	B	C	A	-	-	A	YES
Hydrochloric acid-HCL-20%	A	B	A	A	-	-	-	D	D	D	A	A	YES

Madden Manufacturing (2010)

Figura N°.54 Cuadro de resistencia química de la bomba P-101

APÉNDICE IX

Cálculos realizados

Para obtener las pérdidas debidas a la fricción en válvulas, tuberías, accesorios y cambios de dirección de tuberías, en primer lugar, se debió calcular la velocidad del fluido, para posteriormente obtener los números de Reynolds, definir el factor de fricción en cada caso y mediante las ecuaciones correspondientes, obtener las pérdidas requeridas.

(a) Cálculo del área de flujo

Se calculó el área de flujo en los tubing de 1/4", 1/8" de acero y 1/8" de FEP.

Para la tubería de 1/4" se tiene:

$$A_f = \pi \cdot \left(\frac{4,57 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 = 1,64 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 35})$$

Luego se calculó la velocidad de flujo correspondiente al máximo caudal de la bomba JR-104A Madden ®, utilizando la ecuación N°19:

$$v_f = \frac{4,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{1,64 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 2,74 \text{ m/s} \quad (\text{Ec. 36})$$

Posteriormente se sustituyó en la Ecuación N°15, los valores obtenidos en la ecuación N°35 y N°36:

$$Re = \frac{1000 \text{ Kg/m}^3 \cdot 2,74 \text{ m/s} \cdot 4,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{0,00102 \text{ Pa.s}} = 1146,7 \quad (\text{Ec. 37})$$

De la Ecuación N° 37 que el flujo se comporta de forma laminar. El factor de fricción de Darcy en este caso se obtuvo aplicando la Ecuación N°20:

$$f = \frac{64}{1146,7} = 0,06 \quad (\text{Ec. 38})$$

De forma análoga se realizaron los cálculos para los tubing restantes, en la tablas N°9, N°10 y N°11 se presentaron dichos valores:

La pérdida por fricción en la línea ¼"- P-001-AA1 (va desde la descarga de P-101 hasta V-102) se calculó aplicando la Ecuación N° 14, las longitudes de las tuberías se encuentran en la Tabla N° 14:

$$h_t = 0,06 \cdot \frac{0,047 m}{4,57 \cdot 10^{-3} D_i} \cdot \frac{(2,74 m/s)^2}{2,9,8 m/s^2} = 1,92 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{Ec. 38})$$

En el caso de la válvula antirretorno (V-102), se aplicó la ecuación N°23, el valor del coeficiente de resistencia se obtuvo de la Figura N° 54:

$$h_m = 2 \cdot \frac{(2,74 m/s)^2}{2,9,8 m/s^2} = 6,68 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{Ec. 39})$$

En el caso de V-103 y las válvulas de bola también se utilizaron las gráficas reportadas por Crane (Figura N°54). El coeficiente de resistencia de las válvulas de bola se tomó de la gráfica de compuerta, ya que su servicio también es de abierto-cerrado, para V-103 se tomó como referencia la gráfica de la válvula de globo, su servicio también es para regulación de flujo.

En las válvulas de tres vías el coeficiente de resistencia utilizado se calculó utilizando:

$$k = 90 \cdot f_t \quad (\text{Ec. 40})$$

Todos los coeficientes de resistencia nombrados se tomaron como referencia de Crane (1988).

En el caso de la válvula de regulación (V-104) la caída de presión tomada fue de 7bar, ya que sería la máxima caída de presión a la que estaría sometida.

En el caso de la pérdida en tes, se aplica la ecuación N° 23 con k igual a $20 \cdot f_t$ si es flujo directo y k igual a $60 \cdot f_t$ si es flujo el flujo es en el ramal. Para flujo directo:

$$h_m = 20 \cdot 0,06 \cdot \frac{(2,74 m/s)^2}{2,9,8 m/s^2} = 3,73 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{Ec. 41})$$

En las reducciones se aplicó la Ecuación N° 22 y para el cálculo del coeficiente de resistencia respectivo se aplicó la Ecuación

$$k = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{0,001397^2}{0,004572^2} \right) = 1,51 \cdot 10^{-3} m \quad (\text{Ec. 42})$$

La pérdida de energía en las curvas de 90° se obtuvo mediante la Ecuación N°23, el coeficiente de resistencia en este caso se obtuvo de la Figura N°15, luego de calcular el radio relativo:

$$\frac{r}{D_o} = \left(\frac{0,012m}{6,35 \cdot 10^{-3}} \right) = 1,88 \quad (\text{Ec. 43})$$

El coeficiente de resistencia obtenido a partir del radio relativo calculado es igual a 12, aplicando la Ecuación N°23, se obtiene la pérdida correspondiente a la curva de 90° de la línea ¼” - P-008-AA1:

$$h_m = 12 \cdot 0,06 \cdot \frac{(2,74m/s)^2}{2 \cdot 9,8m/s^2} = 2,24 \cdot 10^{-3}m \quad (\text{Ec. 44})$$

De forma análoga se realizaron dichos cálculos para los demás tramos de tuberías, válvulas y accesorios (Tabla N°12),

En el caso del cálculo del área de flujo en el módulo (rectangular) se aplicaron las ecuaciones N°17 y N°18; en este caso con la velocidad de flujo correspondiente:

La secuencia de cálculos es la siguiente:

$A_r = \text{ancho de la membrana} \cdot \text{largo de la membrana}$

$$A_r = 0,06cm \cdot 2cm = 0,12cm^2 \quad (\text{Ec. 45})$$

$$P_m = 2 \cdot \text{ancho} + 2 \cdot \text{largo} \quad (\text{Ec. 46})$$

$$P_m = 2 \cdot 0,06cm + 2 \cdot 2cm = 4,12cm \quad (\text{Ec. 47})$$

$$Rh = \frac{0,012cm^2}{4,12cm} = 2,91 \cdot 10^{-3} \quad (\text{Ec. 48})$$

$$Re = \frac{1000 \text{Kg}/m^3 \cdot 0,35m/s \cdot 4,2,91 \cdot 10^{-3}}{0,00102Pa.s} = 3994,12 \quad (\text{Ec. 49})$$

También se realizaron dichos cálculos para los caudales de la bomba Speck® (2 L/min y 3,6 L/min) respectivamente.

(b) Cálculo del coeficiente de capacidad de las válvulas.

En la Tabla N° 12 se encuentran reportados los coeficientes de capacidad , se obtuvieron aplicando la Ecuación N°28, la caída d presión tomada fue de 7 bar (101,52 psi), para el doble caudal nominal de la bomba NP10/4-140 Speck® se obtuvo:

$$C_v = 4. \sqrt{\frac{1}{101,52}} = 0,39 \quad (\text{Ec. 50})$$

Y para el doble del caudal máximo de la bomba JR.104A Madden ®:

$$C_v = 0,13. \sqrt{\frac{1}{101,52}} = 0,0129 \quad (\text{Ec. 51})$$

(c) Cálculo del porcentaje de área efectiva de la membrana desaprovechaba en el equipo por cargas.

El soporte de la membrana del equipo por cargas ofrece un área disponible de cinco (5) círculos de 0,886cm de diámetro.

$$A = 5. \pi. \left(\frac{0,886 \text{ cm}}{2}\right)^2 = 3,08 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec. 52})$$

El área total de la membrana es de:

$$A = \pi. \left(\frac{4,7 \text{ cm}}{2}\right)^2 = 17,34 \text{ cm}^2 \quad (\text{Ec. 53})$$

El porcentaje es igual a:

$$\% \text{ de Área} = 100 - \frac{3,08 \text{ cm}^2 \cdot 100}{17,34 \text{ cm}^2} = 82,22\% \quad (\text{Ec. 54})$$

(d) Cálculo del porcentaje de incremento del área efectiva de la membrana en Emulmemb en comparación con el equipo por cargas.

El soporte de la membrana es de forma rectangular y su área es igual a:

$$A_r = \text{ancho del soporte} \cdot \text{largor del soporte} \quad (\text{Ec. 55})$$

$$A_r = 19,7 \text{ mm} \cdot 56,6 \text{ mm} = 1115,02 \text{ mm}^2 = 0,001115 \text{ m}^2 \quad (\text{Ec. 56})$$

El área efectiva del soporte de la membrana del equipo por cargas es de 3,08 cm². El porcentaje se calculó como sigue:

$$\% \text{ de Área} = 100 - \frac{0,000308 \text{ m}^2 \cdot 100}{0,001115 \text{ m}^2} = 72,37\% \quad (\text{Ec. 57})$$

(e) Cálculo de la capacidad de la planta

Para el cálculo de la capacidad de la planta se calculó la masa de agua y de queroseno que puede ocupar un volumen de $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$, utilizando la siguiente ecuación:

$$m = \rho \cdot V \quad (\text{Ec. 58})$$

En el caso del agua:

$$m = 1000 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,4 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 59})$$

En el caso del queroseno:

$$m = 800 \text{ Kg/m}^3 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,32 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 60})$$

En el caso de que el contenido de fase dispersa sea de 25%, la masa de una emulsión tipo W/O, resulta:

$$m \text{ de emulsión } 25\% = \frac{100 \cdot 0,4 \text{ Kg}}{25} = 1,6 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 61})$$

En el caso de que el contenido de fase dispersa sea de 25%, la masa de una emulsión tipo O/W, resulta:

$$m \text{ de emulsión } 25\% = \frac{100 \cdot 0,32 \text{ Kg}}{25} = 1,28 \text{ Kg} \quad (\text{Ec. 62})$$

El volumen que ocupa la emulsión de W/O se calculó como sigue:

$$0,4 \text{ L} + \frac{\text{masa total} - \text{masa de agua}}{\rho \text{ del queroseno}} = \frac{1,6 \text{ Kg} - 0,40 \text{ Kg}}{800 \text{ Kg/m}^3} = 0,0015 \text{ m}^3 = 1,9 \text{ L} \quad (\text{Ec. 63})$$

$$0,4 \text{ L} + \frac{\text{masa total} - \text{masa de agua}}{\rho \text{ del queroseno}} = \frac{1,28 \text{ Kg} - 0,32 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3} = 0,00096 \text{ m}^3 = 1,36 \text{ L} \quad (\text{Ec. 64})$$

De forma análoga se obtuvo el mayor volumen, pero esta vez con 1% de fase dispersa.

(f) Cálculo de altura mínima y altura máxima de los tanques TK-101 y TK-102.

Partiendo del volumen mínimo calculado, y considerando el radio de los tanques igual a 0,1 m con la siguiente ecuación se obtuvo la altura mínima:

$$\text{Altura mínima} = \frac{\text{Capacidad del tanque}}{\pi \cdot \left(\frac{\text{Diámetro}}{2}\right)^2} \quad (\text{Ec. 65})$$

$$\text{Altura mínima} = \frac{1,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{\pi \cdot (0,1\text{m})^2} = 0,254 \text{ m} \quad (\text{Ec. 66})$$

De forma análoga se calculó la altura máxima, esta vez utilizando el volumen máximo.

APÉNDICE X

Formulaciones y variables operacionales de equipos con operación semicontinua

Tabla N°17. Ingredientes de emulsiones preparadas en equipos con operación semicontinua

Autores	Tipo de Emulsión	Membrana Utilizada	Tamaño de Poro	Área efectiva	Fase Acuosa	Fase oleosa	Surfactante/Emulsionante
Vladislavljević . Brösel y Schubert (2000)	W/O	Fibra hueca microporosa: Polipropileno hidrofóbico	0.4µm	0.1m ²	Agua desmineralizada	Aceite Vegetal	Poliglicerol Poliricinoleato (PGPR 90, Danisco Denmark)
Vladislavljević , Schubert (2003)	W/O Y W/O/W	Tubos SPG	1.4-6.6	31.3cm ²	Agua desmineralizada	Aceite de semilla de Colza	Tween 80(polioxi-etileno 20)
Vladislavljević , Lambrich, Nakajima, Schubert (2004)	O/W	SPG y αAl ₂ O ₃	0.4-6.6 1.4 y 0.5	31.3cm ² 50cm ²	Agua desmineralizada	Aceite Vegetal (semilla)	Tween 80(polioxi-etileno 20)
Suzuki, Shuto y Hagura (1996)	O/W	MPG			Agua destilada	Aceite de maíz (Ajonamoto Co., Inc.,)	Poliglicerol Poliricinoleato PGPR PGFE (Sa)amato Yakunin Kogyo Co., Ltd, Japan
Joscelyne y Trägardh (1999)	O/W	αAl ₂ O ₃ Cubiertos de Zirconia, SCT, Modulo Monotubular Membralox	0.5,0.2 0.1 µm	55cm ²	Leche descremada	Aceite Vegetal	Dimodan PVP

Tabla N° 18. Variables Operacionales

Autores	Fase Acuosa	Fase Oleosa	Presión	Esfuerzo de Corte	Temperatura
Vladislavljević . Brösel y Schubert (2000)		2-40l. m ⁻² .h ⁻¹ Flujo de aceite de 5-270Kg. m ⁻² .h ⁻¹			
Vladislavljević , Schubert (2003)		77l. m ⁻² .h ⁻¹ 3.75-15 l. m ⁻² .h ⁻¹	1.2<ΔPtm/Pcap<5.7	0.37-40Pa 30Pa (ideal)	20-25°C
Vladislavljević , Lambrich, Nakajima, Schubert (2004)	0.1 A 49m. h ⁻¹	0.2-79l.m ⁻² .h ⁻¹	0.1<ΔPtm<99Pa 1.2<ΔPtm/Pcap<5.7	0.3-140Pa 5-145Kpa	50°C
Suzuki, Shuto y Hagura (1996)	0.14m/s	0.029-3.55m ³ /m ² .h-membrana	10<P<100Kpa		25°C
Joscelyne y Trägardh (1999)		2-40l. m ⁻² .h ⁻¹ Flujo de aceite de 5-270Kg.m-2.h-1 () O/W	20<ΔPtm<40KPa Pc 40-430KPa	20-110Pa 135Pa ; 100 y 250KPa	65°C , 70°C, 60°C