

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN DE UN EQUIPO LIBRE DE MERCURIO QUE REALIZA ESTUDIOS PVT (PRESIÓN, VOLUMEN, TEMPERATURA) EN CRUDOS PESADOS**

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs.: Hernández Padrón, Vanessa  
Tavera Vargas, John Alexander  
Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN DE UN EQUIPO LIBRE DE MERCURIO QUE REALIZA ESTUDIOS PVT (PRESIÓN, VOLUMEN, TEMPERATURA) EN CRUDOS PESADOS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Enrique Limongi

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Arturo Borges

Presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Por los Brs.: Hernández Padrón, Vanessa  
Tavera Vargas, John Alexander  
Para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2007

Caracas, Julio 2007

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar al Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Vanessa Hernández y John Tavera, titulado:

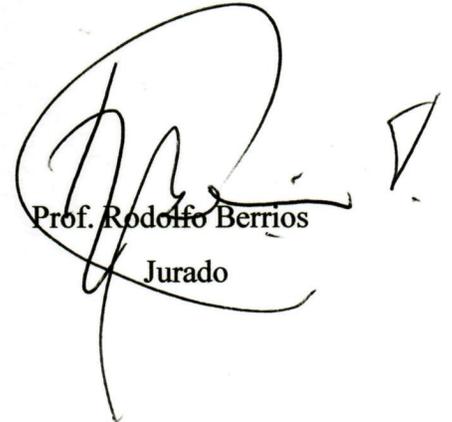
**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN DE UN EQUIPO LIBRE DE MERCURIO QUE REALIZA ESTUDIOS PVT (PRESIÓN, VOLUMEN, TEMPERATURA) EN CRUDOS PESADOS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores:



Prof. Antonio Barragán

Jurado



Prof. Rodolfo Berrios

Jurado



Prof. Enrique Limongi

Tutor Académico



## DEDICATORIA

*Vanessa:*

A mis padres Armando y Juana.

*John:*

Primeramente a Dios todopoderoso, quien me creó, me llena de bendiciones, hace posible cada una de mis respiraciones y le da sentido a mi existir. A él pertenece mi vida y todo lo que hay en ella.

A mi madre, Leonor, la persona más importante en mi vida y la que más me ama. No he sido yo quien ha llegado hasta aquí y ha realizado este trabajo, sino ella a través de todo su amor y sacrificios para conmigo.

## AGRADECIMIENTOS

A nuestra casa de estudios, la Universidad Central de Venezuela, por habernos formado como profesionales y habernos dado enseñanzas de vida.

Al profesor Enrique Limongi, tutor académico de este trabajo, por sus enseñanzas y consejos, por el interés mostrado a lo largo de esta investigación, y por sus sugerencias, las cuales tuvieron la intención de lograr un trabajo de excelencia.

A Arturo Borges, tutor industrial de este trabajo, quien nos dio la oportunidad laboral para realizar este proyecto. Gracias por confiar en nosotros aun sin llegar a conocernos bien, por darnos tu amistad y toda tu ayuda y apoyo de una manera totalmente desinteresada, por demostrarnos con tu ejemplo que en la vida a pesar de la posición o cargo en que uno se encuentre debe ante todo ser humilde y buscar la manera de ayudar a los demás. Gente como tú es la que hace falta para hacer de este mundo un mejor lugar...nuestra gratitud y admiración.

A Mauricio Sastoque, Angel Medina, Darío Delfín, Arturo Mendoza, Fager Barh y Jonathan López, sin cuyo apoyo y dedicación no hubieran sido posibles los logros alcanzados durante este trabajo; gracias por tomarlo como si fuera de ustedes mismos.

A Gerson Siachoque, Carlos Conde, Miguel Paraco, José Gregorio Hernández, Jorge Giménez, Yordis Caraballo, Ana Barrios, Patricia Goncálvez, Renny Colmenares, Jesús Luque, María Yanet Camacho, Jessika Peralta y a aquellos que no fueron nombrados pero debieran estar incluidos en esta lista; gracias por el apoyo prestado, las enseñanzas dadas, el compañerismo mostrado y por compartir con nosotros haciéndonos sentir como dos más de ustedes.

A María Cecilia Muñoz, Leonardo Gil y Marianna Casado, por brindarnos su apoyo en la realización de este trabajo.

Al personal del taller mecánico, departamento de electrónica, a los señores Félix Coronado, Rafael Marcano y Manuel Chirinos, y en general a todos aquellos trabajadores de PDVSA Intevp que colaboraron dentro de este proyecto.

*Vanessa:*

A mis papis Armando y Juana y mi hermanito Arman, por ser los mejores ejemplos, por alentarme y apoyarme en cada decisión, los quiero infinito.

A mis amigas de toda la vida Mari, Flor y Yese, por siempre estar allí y por decir las palabras justas en el momento oportuno.

A mis amigos de la uni Carli, Chupi, El Negro, Johane, Micki, Landi, Johnny, Dennys, Pabli y Alfre quienes me han acompañado y apoyado no solo en este proyecto sino en toda mi carrera.

A Leito, Ceci, Chistian y Angelito quienes sufrieron este año de angustia conmigo y me demostraron que nunca es tarde para hacer nuevos amigos. Leito, gracias por todo el apoyo, las atenciones y la paciencia.

A John por aceptarme en este proyecto y por aguantar este año de tensión.

Y por último a todas aquellas personas que no he nombrado y que de alguna u otra forma colaboraron en este proyecto, Gracias... Muchas Gracias.

*John:*

A mi Dios Padre. No tengo palabras para agradecer todas las maravillas que has hecho en mi vida, así que lo haré de la manera más corta en que puedo: gracias por darme la vida y todo lo que me rodea, por llevarme sobre tus brazos en todo momento, por hacerme sentir tu amor y haberme permitido conocerte...Gracias Señor.

A mi mamá Leonor por dedicarme toda su vida y demostrarme un amor infinito.

A mi papá Pedro Pablo por su apoyo y ayuda incondicionales, y a mi hermano Andrés por formar parte de mi vida.

A todos mis amigos: a mi pana del alma Rolando (a quien considero un hermano más), a Carlos (Assante), Noel, Andrea (la distancia no ha afectado el cariño especial que te tengo); a los de la universidad: Carlos, Chupi, Roberto, El Negro, Johane, Micky, Andrés y aquellos que estuvieron a mi lado en algún momento de mi carrera; y a los que llegaron durante este trabajo: Leo, Ceci, Chistian, María Claudia, Angel y Adri. Gracias por su cariño, compañía, apoyo y por los buenos momentos vividos.

A Vanessa por todo su aporte para con este trabajo.

Hernández P., Vanessa. Tavera V., John A.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL SISTEMA DE AGITACIÓN  
DE UN EQUIPO LIBRE DE MERCURIO QUE REALIZA  
ESTUDIOS PVT (PRESIÓN, VOLUMEN, TEMPERATURA) EN  
CRUDOS PESADOS**

**Tutor Académico: Prof. Enrique Limongi. Tutor Industrial: Ing. Arturo Borges.  
Trabajo Especial de Grado. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de  
Ingeniería Mecánica. 2007, 198 pag.**

**Palabras Claves:** celda PVT, crudo pesado, sistema de agitación

**RESUMEN**

Este Trabajo Especial de Grado tuvo como objetivo principal efectuar el diseño y la construcción del sistema de agitación de un Equipo Libre de Mercurio que realiza estudios PVT en crudos pesados. Para ello, se realizó una evaluación de las ventajas y desventajas de diferentes sistemas de agitación de equipos PVT para petróleo negro. Este análisis condujo a determinar que el medio más adecuado para suministrar la energía mecánica causante de la perturbación del fluido es a través del movimiento giratorio de un impulsor. Se planteó una metodología experimental que permitiera evaluar los principales parámetros y relaciones geométricas, que pudieran influir en el proceso de agitación, mediante un impulsor, de un fluido de muestra sometido a los estudios PVT. Se diseñaron y construyeron seis impulsores tipo turbina en dos relaciones de tamaño y un Banco de Pruebas que permitió desarrollar la metodología planteada. Todo esto llevó a obtener el diseño y la construcción del sistema de agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados, capaz de disminuir el tiempo de separación de las fases para muestras de crudo con viscosidad de hasta 6.000 cP y volumen de 600 cc. Esto representa una innovación en cuanto a sistemas de agitación de equipos PVT se refiere, pues en el mercado no existen equipos con un sistema de agitación de estas características.

**INDICE GENERAL**

DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iv
INDICE GENERAL	v
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABLAS	xiv
NOMENCLATURAS Y SÍMBOLOS	xvi
Capítulo I: Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. Planteamiento del Problema	6
1.3. Objetivo General	7
1.4. Objetivos Específicos	8
1.5. Alcances	8
Capítulo II: Marco Referencial	9
2.1. Comportamiento de Fases de los Fluidos de Yacimientos	9
2.1.1. Yacimiento de Petróleo	11
2.1.1.1. Yacimientos de Petróleo Volátil	11
2.1.1.2. Yacimientos de Petróleo Negro	12
2.2. Estudio de las Propiedades de los Fluidos de Yacimientos: Estudios PVT	13
2.2.1. Estudios de las Propiedades del Petróleo Negro	14
2.2.1.1. Proceso de Liberación Instantánea Flash	15
2.2.1.2. Prueba de Expansión a Composición Constante	16
2.2.1.3. Proceso de Liberación Diferencial	18
2.2.1.4. Pruebas de Separadores	19
2.1.1.5. Estudio de Viscosidad	20
2.3. Agitación	20
2.3.1. Definición y Características de la Agitación	21

---

---

2.3.2. Fuerzas Involucradas	21
2.3.3. Régimen Laminar y Turbulento	22
2.3.4. Mecanismos de Transporte de Materia	22
2.3.5. Vórtices	23
2.3.6. Patrones de Flujo	24
2.3.7. Equipamiento	26
2.3.7.1. Recipientes	28
2.3.7.2. Mamparas	29
2.3.7.3. Impulsores	29
2.3.7.4. Motor	38
2.3.8. Semejanza Geométrica: Herramienta para el Escalado	39
2.3.9. Potencia en Agitación	42
2.3.9.1. Números Adimensionales	43
2.3.9.2. Correlación de los Números Adimensionales y Curvas de Correlación	45
2.3.9.3. Correlaciones para Turbinas	48
2.3.10. Agitación en Sistemas Gas-Líquido	50
2.3.10.1. Formación de Burbujas	50
2.3.10.2. Velocidad Terminal de las Burbujas	52
2.3.10.3. Burbujeador	53
2.3.10.4. Potencia en Presencia de Gas	53
2.3.10.5. Separación de Fases	54
2.3.11. Diseño Mecánico de los Impulsores	55
2.3.11.1. Diseño del Eje del Impulsor	55
2.3.11.2. Espesor de Hoja del Impulsor	56
2.4. Esfuerzos Mecánicos	57
2.5. Propiedades Mecánicas	58
2.6. Esfuerzos en Recipientes Cilíndricos de Pared Delgada Sometidos a Presión	
Interna	60
2.6.1. Esfuerzos Circunferenciales	61
2.6.2. Esfuerzos Longitudinales	62

2.7. Predicción de Fallas	63
2.7.1. Falla de Materiales Frágiles	64
2.7.1.1. Teoría del Esfuerzo Normal Máximo	65
2.7.1.2. Teoría de Coulomb-Mohr o Teoría de la Fricción Interna	65
2.8. Proceso y Métodos de Diseño	66
2.8.1. Método del Análisis de Funciones	67
2.8.2. Método de Objetivos Ponderados	67
2.9. Sellos	67
2.10. Acoplamiento Magnético	69
2.11. Otras Fórmulas Importantes	71
2.11.1. Densidad Promedio y Viscosidad Efectiva de una Mezcla Líquido-Líquido	71
2.11.2. Media y Desviación Estándar	72
Capítulo III: Marco Metodológico	74
3.1. Análisis del Problema de Diseño: El Sistema de Agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados	75
3.1.1. Recopilación de Información Bibliográfica sobre el Petróleo Pesado y los Estudios PVT para Petróleo	75
3.1.2. Actividades en los Laboratorios de Análisis de PVT Libre de Mercurio, PVT Crudos Pesados y Análisis de Crudos Pesados	75
3.1.3. Determinación de las Ventajas y Desventajas de los Sistemas de Agitación de los Equipos PVT para Petróleo Negro Existentes en el Mercado	77
3.1.3.1. Equipo PVT de la Compañía Chandler Engineering	78
3.1.3.2. Equipo PVT de la Compañía Temco	80
3.1.3.3. Equipo PVT de la Compañía Vinci Technologies	81
3.1.3.4. Equipo PVT de la Compañía DB Robinson	82
3.1.3.5. Equipo PVT de la Compañía Ruska Instrument Corporation	83
3.1.3.6. Equipo PVT de la Compañía DB Robinson, Diseñado para PDVSA Intevep	84
3.1.4. Propuesta del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados	87

3.1.5. Definición de Funciones y Requerimientos de Diseño del Sistema de Agitación	89
3.2. Propuesta del Sistema de Agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados	91
3.2.1. Diseño Conceptual: Alternativas para el Sistema de Agitación	91
3.2.2. Diseño para Dar Forma a las Alternativas del Sistema de Agitación	95
3.3. Análisis Teórico-Experimental del Impulsor del Sistema de Agitación	99
3.3.1. Investigación Teórica: Recipientes Agitados Mecánicamente	99
3.3.2. Diseño Conceptual: Planteamiento de los Modelos de Impulsores	100
3.3.3. Planificación de las Pruebas Experimentales para los Impulsores	104
3.3.3.1. Definición de los Objetivos del Experimento	105
3.3.3.2. Determinación de las Magnitudes Representativas para las Condiciones de la Unidad Experimental	107
3.3.3.3. Consideraciones para las Pruebas Experimentales	114
3.3.3.4. Estimación de la Velocidad Angular, Torque y Potencia de los Impulsores	115
3.3.4. Diseño y Construcción del Banco de Pruebas	116
3.3.4.1. Planteamiento del Problema	117
3.3.4.2. Estudio de la Necesidad	117
3.3.4.3. Generación y Evaluación de las Soluciones	120
3.3.4.4. Propuesta y Desarrollo del Concepto Solución	126
3.3.4.5. Diseño de Detalles y Verificación de Aspectos Técnicos	139
3.3.4.6. Toma de Datos del Banco de Pruebas	146
3.3.4.7. Banco de Pruebas	148
3.4. Dimensionamiento y Construcción de los Impulsores	151
3.4.1. Determinación de las Dimensiones Características	151
3.4.1.1. Cálculo del Espesor de Hojas del Impulsor	152
3.4.1.2. Determinación del Diámetro del Eje del Impulsor	154
3.4.2. Balaceo Dinámico	156
3.5. Metodología Experimental para la Evaluación de los Impulsores	157

---

---

3.5.1. Selección del Sistema Líquido-Gas y las Condiciones de Trabajo	161
3.5.1.1. Presión y temperatura de trabajo	161
3.5.1.2. Tiempo Máximo	164
Capítulo IV: Análisis de Resultados	166
4.1. Fase A. Evaluación de la relación $D/T$ : Resultados y sus análisis.	166
4.2. Fase B. Evaluación de los modelos de impulsores: Resultados y sus análisis	169
CONCLUSIONES	176
RECOMENDACIONES	179
BIBLIOGRAFÍA	180
APÉNDICE A. Tablas	185
APÉNDICE B. Figuras y Gráficas	188
APÉNDICE C. Planos	198

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1. Esquema de los sistemas PVT con mercurio para petróleo negro.	3
Figura 2. Diagrama de fases para una mezcla de hidrocarburos.	10
Figura 3. Esquema de clasificación de los yacimientos de hidrocarburos.	11
Figura 4. Diagrama de fases del petróleo negro.	12
Figura 5. Proceso de liberación flash para petróleo negro.	16
Figura 6. Prueba de expansión a composición constante para petróleo negro.	17
Figura 7. Comportamiento del volumen relativo en función de la presión durante una prueba de expansión a composición constante de petróleos negros.	18
Figura 8. Proceso de liberación diferencial para petróleo negro.	19
Figura 9. Prueba de separadores en tres etapas para petróleo negro.	20
Figura 10. Fenómeno de vórtice central.	24
Figura 11. Patrones de flujo de los impulsores.	25
Figura 12. Equipo de agitación mecánica.	26
Figura 13. Variables geométricas definidas en agitación mecánica.	27
Figura 14. Montaje del eje del impulsor.	27
Figura 15. Recipiente para agitación mecánica.	28
Figura 16. Impulsores.	30
Figura 17. Diseño de una propela.	31
Figura 18. Diseños básicos de turbinas.	32
Figura 19. Turbina de hojas planas.	33
Figura 20. Turbina de disco de hojas planas.	34
Figura 21. Turbina de hojas inclinadas.	35
Figura 22. Diseños de paletas.	37
Figura 23. Diagrama para la selección del impulsor.	38
Figura 24. Principales dimensiones en la semejanza geométrica de recipientes de agitación mecánica.	40
Figura 25. Curvas de potencia características de los impulsores.	46

Figura 26. Curvas de $N_p$ vs. $N_{Re}$ para diferentes turbinas.	49
Figura 27. Curva esfuerzo-deformación obtenida a partir de un ensayo de tracción.	59
Figura 28. Esfuerzos en recipientes cilíndricos de pared delgada sometidos a presión interna.	61
Figura 29. Esfuerzos circunferenciales y fuerzas debidas a la presión interna.	62
Figura 30. Esfuerzos longitudinales y fuerzas debidas a la presión interna.	63
Figura 31. Esquema del proceso de diseño.	66
Figura 32. Acople magnético.	70
Figura 33. Metodología a desarrollar para el diseño y la construcción del sistema de agitación de un Equipo Libre de Mercurio que realiza estudios PVT en crudos pesados.	74
Figura 34. Sistema de agitación del equipo PVT de Chandler Engineering.	79
Figura 35. Sistema de agitación del equipo PVT de Temco.	80
Figura 36. Sistema de agitación del equipo PVT de Vinci Technologies.	82
Figura 37. Sistema de agitación del equipo PVT de la compañía DB Robinson.	83
Figura 38. Sistema de agitación del equipo PVT de Ruska Instrument Corporation.	84
Figura 39. Mecanismo de transmisión del sistema de agitación del equipo PVT de DB Robinson diseñado para PDVSA Intevep.	85
Figura 40. Sistema de agitación del equipo PVT de DB Robinson diseñado para PDVSA Intevep.	86
Figura 41. Propuesta del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados.	89
Figura 42. Transmisión de potencia a través de un eje.	93
Figura 43. Transmisión de potencia magnética.	93
Figura 44. Diseño para dar forma al sistema de agitación con transmisión magnética de potencia.	97
Figura 45. Impulsores LIGHTNIN de alto rendimiento seleccionados.	102
Figura 46. Comportamiento de la viscosidad de un cierto crudo pesado venezolano de 8,6 °API durante un estudio PVT a temperatura de yacimiento (122 °F).	109
Figura 47. Modelo de caja negra para el Banco de Pruebas.	119
Figura 48. Soluciones propuestas para el recipiente a presión.	120

Figura 49. Sistema Cilindro – Bomba de desplazamiento positivo	121
Figura 50. Solución para la inyección del gas de prueba.	122
Figura 51. Tubo de cobre con orificio de 0,5 mm.	125
Figura 52. Solvent Filter (WAT025531).	125
Figura 53. Propuesta para el Banco de Prueba.	126
Figura 54. Curva de tracción de termoplásticos.	128
Figura 55. Bomba ISCO 500D.	130
Figura 56. Cilindro tipo pistón.	130
Figura 57. Gráfica de Torque vs rpm- Rango de baja velocidad.	131
Figura 58. Gráfica de Torque vs rpm- Rango de alta velocidad.	131
Figura 59. Dimensiones del motor.	132
Figura 60. Esquema del Recipiente a Presión.	133
Figura 61. Descomposición de la longitud total de la celda.	134
Figura 62. Tapa del recipiente a presión.	135
Figura 63. Barras Sopor.	135
Figura 64. Diagrama de disposición de tubos soportes.	136
Figura 65. Barras soporte.	137
Figura 66. Tapa inferior.	138
Figura 67. Tapa superior.	138
Figura 68. Recipiente a presión.	139
Figura 69. Soporte del recipiente a presión.	139
Figura 70. Recipiente antidistorsión.	140
Figura 71. Diagrama de cuerpo libre de la tapa.	142
Figura 72. Diagrama de cuerpo libre de las barras soporte.	143
Figura 73. Rediseño del sellado.	146
Figura 74. Panel de control de la presentación y toma de datos.	147
Figura 75. Esquema de la instalación del Banco de Pruebas.	148
Figura 76. Banco de Pruebas.	149
Figura 77. Montaje del recipiente a presión.	150
Figura 78. Impulsor tipo turbina de hojas planas ( $D/T = 0,85$ ).	153

Figura 79. Impulsor tipo turbina de disco de hojas planas ( $D/T = 0,85$ ).	153
Figura 80. Impulsor tipo turbina de hojas inclinadas ( $D/T = 0,85$ ).	154
Figura 81. Turbinas construidas.	156

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1. Clasificación UNITAR del petróleo negro según su gravedad API.	13
Tabla 2. Selección de sellos de acuerdo a la función que deba cumplir.	68
Tabla 3. Dimensiones estándar y establecidas para cada impulsor tipo turbina básica.	103
Tabla 4. Fuentes de variación para las pruebas experimentales de los impulsores.	106
Tabla 5. Relación presión-densidad del líquido para un cierto crudo de 8,2 °API a temperatura de yacimiento (datos por debajo del punto de burbuja).	110
Tabla 6. Relación presión-densidad del líquido para un cierto crudo de 16,7 °API a temperatura de yacimiento (datos por debajo del punto de burbuja).	110
Tabla 7. Densidades del gas de tres crudos para cada etapa de liberación diferencial.	112
Tabla 8. Volúmenes de gas desprendido (presión y temperatura de los estudios) para cada etapa de liberación diferencial de tres crudos.	113
Tabla 9. Volúmenes de gas liberado (presión y temperatura de los estudios) para cada etapa de liberación diferencial de tres crudos.	114
Tabla 10. Especificaciones del Banco de Pruebas.	118
Tabla 11. Ponderación de objetivos.	123
Tabla 12. Escala de cinco puntos para calificación de diseños.	124
Tabla 13. Evaluación de las alternativas para el recipiente a presión.	124
Tabla 14. Propiedades mecánicas del acrílico.	127
Tabla 15. Comparación entre el aluminio y el acero inoxidable.	128
Tabla 16. Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable AISI 316.	129
Tabla 17. Velocidad angular y torque máximo para rangos de baja y alta velocidad.	131
Tabla 18. Dimensiones de tubos de acrílico.	133
Tabla 19. Dimensiones de los diseños de impulsores tipo turbinas.	151
Tabla 20. Espesor de hojas del impulsor.	153

Tabla 21. Nomenclatura de Impulsores.	158
Tabla 22. Velocidad angulares manejadas en Fases A y Fases B.	159
Tabla 23. Matriz de experimento para la Fase A.	159
Tabla 24. Matriz de experimentos para la Fase B.	159
Tabla 25. Tabla de observación de experimentos.	160
Tabla 26. Características de los Patrones de Viscosidad a 20°C.	161
Tabla 27. Características de los Patrones de Viscosidad a 20°C.	162
Tabla 28. Comparación entre viscosidad teórica y viscosidad práctica.	163
Tabla 29. Densidades de gases a condiciones de trabajo de las pruebas.	163
Tabla 30. Tiempos máximos de ascenso de burbujas.	164
Tabla 31. Nomenclatura de Impulsores.	166
Tabla 32. Disco de hojas planas, $N_{Re} = 7$ al variar la relación D/T.	167
Tabla 33. Hojas planas, $N_{Re} = 7$ al variar la relación D/T.	167
Tabla 34. Hojas inclinadas, sentido horario, $N_{Re} = 7$ al variar la relación D/T.	167
Tabla 35. Hojas inclinadas, sentido antihorario, $N_{Re} = 7$ al variar la relación D/T.	168
Tabla 36. Tiempo de ascenso de burbujas para la Fase B.	170
Tabla 37. Impulsores seleccionados de la Fase B.	170
Tabla 38. Disco de hojas planas, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	171
Tabla 39. Hojas planas, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	171
Tabla 40. Hojas inclinadas, sentido horario, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	171
Tabla 41. Hojas inclinadas, sentido antihorario, $N_{Re}=7$ y $N_{Re} =14$	172
Tabla 42. A-310, sentido horario, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	172
Tabla 43. A-310, sentido antihorario, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	172
Tabla 44. A-100, sentido horario, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	173
Tabla 45. A-100, sentido antihorario, $N_{Re}=7$ y $N_{Re}=14$ .	173
Tabla 46. Tiempo de ascenso de burbujas, N constantes.	174
Tabla 47. Hojas planas, $N=94$ rpm.	174
Tabla 48. Hojas inclinadas, sentido antihorario, $N=82$ rpm.	175
Tabla 49. A-100, sentido antihorario, $N=79$ rpm.	175

**NOMENCLATURAS Y SÍMBOLOS**

A	Área
B	Ancho de cada mampara
C	Distancia desde el fondo del recipiente hasta el plano medio del impulsor
D	Diámetro de impulsor
$D_B$	Distancia entre barras soportes
$d_b$	Diámetro de burbuja a la salida del filtro
$d_i$	Diámetro interno de la celda
$d_s$	Diámetro mínimo del eje del impulsor por esfuerzo cortante
$D_t$	Espesor de hoja del impulsor
$d_t$	Diámetro mínimo del eje del impulsor por esfuerzo de tensión
$E_t$	Espesor total de la tapa
F	Fuerza
$L_C$	Longitud total de la celda
$L_G$	Longitud de la capa de gas
$L_P$	Longitud del pistón de la tapa
$L_L$	Longitud del líquido de prueba
M	Momento flector
N	Velocidad angular del impulsor
n	Número hojas del impulsor
$n_d$	Factor de seguridad
$N_p$	Número de potencia
$N_{Re}$	Número de Reynolds
p	Inclinación de las hojas del impulsor con respecto al plano horizontal
$P_C$	Presión dentro de la celda PVT
$P_G$	Presión del gas
$PM_G$	Peso molecular del gas
$P_R$	Presión del recipiente a presión
R	Constante universal de los gases
R	Radio del impulsor
$r_{BD}$	Radio de distribución de las barras soportes
$r_{ext C}$	Radio exterior de la celda
$R_h$	Radio del cubo del impulsor
S	Esfuerzo permisible de trabajo
s	desviación estándar
$S_c$	Resistencia a la compresión
$S_t$	Resistencia a la tracción
T	Diámetro interno del recipiente
t	Espesor de la celda
$T_C$	Temperatura dentro de la celda PVT
$T_G$	Temperatura del gas

$T_Q$	Torque del eje del impulsor
$V_G$	Volumen de gas
$V_L$	Volumen de líquido
$W$	Ancho del impulsor
$Z$	Altura de la columna de fluido dentro del recipiente
$Z_G$	Factor de compresibilidad del gas
$\bar{X}$	Media

**Letras Griegas**

$\mu$	Viscosidad dinámica
$\mu_L$	Viscosidad dinámica del líquido
$\mu_m$	Viscosidad efectiva de una mezcla líquido-líquido
$\rho$	Densidad
$\rho_{av}$	Densidad promedio de una mezcla líquido-líquido
$\rho_G$	Densidad del gas
$\rho_L$	Densidad del líquido
$\sigma_c$	Esfuerzo circunferencial
$\sigma_l$	Esfuerzo longitudinal
$\sigma_s$	Esfuerzo de corte
$\sigma_t$	Esfuerzo de tensión

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Venezuela posee inmensas reservas de crudo pesado que se encuentran ubicadas principalmente en la Faja del Orinoco, la cual representa la acumulación más grande del mundo contando con 235 mil millones de barriles (1 barril equivale a 159 litros) entre crudo pesado y extrapesado. A diferencia de los crudos livianos y medianos, el crudo pesado requiere de procesos más complejos y costosos para su extracción y tratamiento; pero el reciente proceso de cuantificación y certificación de las reservas ubicadas en la Faja del Orinoco, que posicionará a Venezuela como el país con las mayores reservas de crudo a nivel mundial, hace que valga la pena buscar nuevas maneras de mejorar la industria del crudo pesado en nuestro país.

En la actualidad, los estudios PVT para crudos pesados que se llevan a cabo en PDVSA Intevep se realizan en equipos que trabajan con mercurio, que datan del año 1958, empleando tecnología ya antigua y poco práctica, que trae como consecuencia la realización de los estudios PVT con algunos inconvenientes. Estos inconvenientes producen cierta desconfianza en el análisis PVT que se lleva a cabo en estos equipos, ya que pueden ocasionar resultados imprecisos en la determinación de las propiedades de los fluidos del yacimiento, y por consiguiente afectar la calidad de la productividad del yacimiento.

PDVSA Intevep, siendo el centro de investigación y apoyo tecnológico de la industria petrolera y petroquímica nacional, a través de la Gerencia General de Exploración y Producción, pretende optimizar y hacer más confiables los estudios PVT para crudos pesados. En tal sentido, el presente Trabajo Especial de Grado surge como un requerimiento inicial para poder obtener un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados, que solvante los inconvenientes presentes hoy en día y que pueda satisfacer las demandas actuales y futuras de la industria petrolera venezolana.

Los dibujos en dos y tres dimensiones realizados para la visualización del diseño fueron elaborados con el programa INVENTOR, con licencia de PDVSA Intevep. Las presiones serán expresadas en psi, los esfuerzos y las resistencias en Mpa.

### 1.1. Antecedentes

Con el surgimiento de la industria petrolera se empezaron a llevar a cabo los primeros estudios para determinar el comportamiento de los fluidos de yacimiento, dentro y fuera del mismo, los cuales empleaban cálculos y correlaciones empíricas que suministraban resultados imprecisos, dificultando la predicción de la vida útil de los yacimientos.

Con el pasar del tiempo se fue buscando mayor precisión en dichos estudios, y en los años 40 se comienzan a emplear los primeros equipos para la determinación de las propiedades PVT, los cuales tienen como elemento clave el mercurio líquido (Ruska, 1992). La Figura 1 muestra un diagrama de estos equipos, sus principales componentes son: (a) una celda de acero, dentro de la cual es confinada la muestra para someterla a las presiones y temperaturas requeridas en los ensayos; (b) una bomba volumétrica graduada de inyección de mercurio, que permite suministrar mercurio tanto a la celda para variar el volumen de ésta -actuando el mercurio como pistón-, como también al contenedor de muestra, para así desplazar ésta al interior de la celda; (c) un tanque con baño caliente de aceite de silicona, termostáticamente controlado, para suministrarle a la muestra la temperatura deseada mediante la inmersión de la celda en el baño; (d) manómetros de precisión, que conectados a la línea de la bomba, permiten cuantificar la presión suministrada a la muestra dentro de la celda y dentro del contenedor; y (e) un dispositivo de agitación mecánica conectado a la celda -mas no en contacto directo con el fluido-, que en conjunto con el mercurio dentro de ésta, ayuda a la muestra a: en estado monofásico, estabilizar la fase simple; y en estado bifásico, alcanzar en menor tiempo el equilibrio de las fases coexistentes u homogeneizarlas.

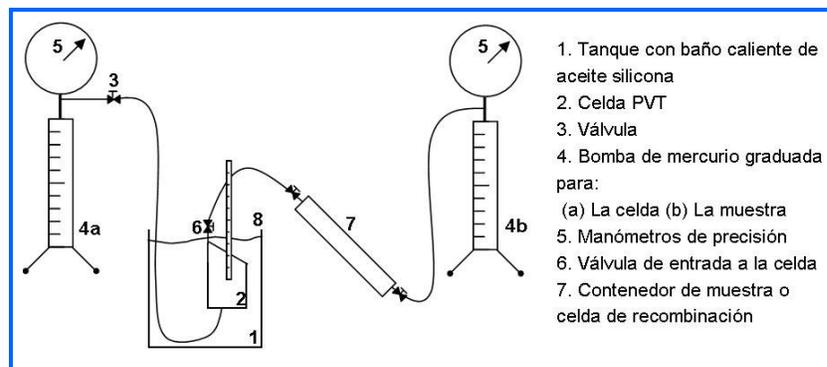


Figura 1. **Esquema de los sistemas PVT con mercurio para petróleo negro.** Tomada de Properties oil and natural gases (p.42) por Peterson, Fedenslund y Thomassen, 1989, Texas: Gulf Publishing Company. Modificaciones de los autores.

Berdugo y otros (2005), afirman que estos equipos han empleado el mercurio como mecanismo de desplazamiento ya que tiene las siguientes características:

- Inmiscibilidad: no se mezcla con los fluidos de yacimiento.
- No absorción: no absorbe los fluidos o gases.
- Densidad: más denso que los fluidos de trabajo.
- Incompresibilidad: permite mediciones de presión y volumen precisas.
- Estado físico: le posibilita fluir dentro de equipos sometidos a presión.

Por otra parte, el emplear mercurio en estos equipos conlleva considerables inconvenientes: es un elemento sumamente tóxico y además, la mayoría de los petróleos negros forman una emulsión estable con el mercurio, en la cual no se distingue la interfase petróleo-mercurio, perdiéndose así parte de la certeza del estudio (Ruska, 1992).

Para solventar estos inconvenientes, a comienzos de los años 90 se empezaron a adoptar los primeros equipos PVT libres de mercurio (Berdugo y otros, 2005). En 1987, Laugier y Richon presentaron un nuevo tipo de equipo, se trata de un aparato Micro-PVT sin mercurio, el cual trabaja con pequeñas cantidades de muestra, sometiéndola hasta presiones de 10.500 psi y temperaturas de 392 °F. El equipo cuenta con una celda ciega, lo suficientemente liviana para permitirle ser pesada en una balanza analítica de alta precisión, antes y después de introducirle la muestra, y así determinar su masa por diferencia de pesos. Se suprime el uso del mercurio en este equipo al variar el volumen de la celda mediante el movimiento de un pistón, el

cual es empujado por un fluido presurizado por medio de una prensa hidráulica electrónica, conectada a la parte inferior de la celda. La celda está envuelta en una camisa a través de la cual circula un líquido que provee el baño térmico. La energía térmica necesaria para calentar el baño de líquido es proporcionada por un serpentín eléctrico enrollado alrededor de la camisa. La agitación de la muestra la realiza un magneto conectado al tope del pistón, accionado a través de un campo magnético giratorio generado por seis solenoides situados alrededor de la camisa térmica. El aparato posee otros componentes necesarios en los análisis PVT y su funcionamiento es automatizado.

Ruska Instrument Corporation desarrolla en 1989 un sistema libre de mercurio llamado Ruska 2370-601 Mercury-free PVT System, el cual trabaja con presiones de hasta 10.000 psi y temperaturas de hasta 400 °F. El equipo está basado en un arreglo de celda dual; donde el volumen de la celda principal (de capacidad nominal 400 cc) es variado mediante el desplazamiento vertical de un pistón, accionado éste por un motor que a su vez es controlado por un computador; y el volumen de la celda secundaria (de capacidad nominal 600 cc) es controlado por medio de un fluido hidráulico. Cada celda está provista de un sistema de agitación que posee un aro magnético interior que se desplaza longitudinalmente a través de las celdas, gracias a la conexión magnética entre dicho aro y un aro exterior. El Ruska 2370-601 Mercury-free PVT System cuenta además con una bomba de desplazamiento positivo y dispone de una computadora para controlar y monitorear los parámetros de funcionamiento.

La compañía DB Robinson desarrolla un sistema PVT libre de mercurio para crudos pesados en la década de los años 90, el cual trabaja con presiones de hasta 3.000 psi y temperaturas de hasta 300 °F. El equipo cuenta con una celda totalmente visual, de volumen nominal de 900 cc, con capacidad de invertirse para facilitar la miscibilidad del petróleo y el gas; un sistema de agitación mecánica constituido por un motor que acciona un eje agitador, el cual entra en la celda y actúa directamente sobre la muestra; una bomba de desplazamiento positivo y un sistema automatizado de adquisición de datos.

Los cambios que surgieron en el diseño de equipos PVT libres de mercurio son: (a) la sustitución de una celda ciega por una celda visual provista de un visor y una ventana; (b) la eliminación del mercurio como agente facilitador de la agitación del fluido de muestra, por medio de la implementación de un sistema de agitación mecánica o magnética, en contacto directo con el fluido en el interior de la celda; (c) la sustitución del baño de aceite de silicona por un horno eléctrico y digital, que suministra un baño de aire caliente alrededor de la celda; (d) la eliminación del mercurio como mecanismo de variación del volumen interno de la celda, mediante la implementación de un pistón accionado, bien sea por una bomba de desplazamiento positivo que trabaja con agua o aceite, o por un motor eléctrico acoplado a un tornillo sin fin; (e) la lectura de las diferentes variables pasó a ser digital; y (f) la medición del volumen de muestra y el control de la temperatura y presión es ahora automatizado.

El primer paso seguido por PDVSA Intevep para la eliminación del mercurio en los equipos utilizados para los análisis PVT, fue la adquisición en el año 1992 del equipo Ruska 2370-601 Mercury-free PVT System. Este aparato trabaja con sistemas de gas condensado y petróleo negro (mediano y liviano). Luego, en 1994 se adquiere el sistema PVT libre de mercurio para petróleo negro pesado de la compañía DB Robinson, desarrollado por encargo de PDVSA Intevep y bajo sus criterios. Hasta la fecha, no se tiene conocimiento de otra compañía que oferte equipos PVT libres de mercurio para crudos pesados, ya que compañías importantes en esta área, tales como Chandler Engineering, Temco, Vinci Technologies y Sanchez Technologies, sólo ofertan sistemas PVT libres de mercurio para crudos medianos, livianos, volátiles y condensados.

El equipo de la compañía DB Robinson ha presentado los siguientes inconvenientes en su funcionamiento:

- Deficiencias en el sistema de agitación: este sistema emplea un mecanismo de sellado que ocasiona pérdidas considerables de muestra por fuga. Por otra parte, como consecuencia de un descuido operacional el eje del agitador mecánico falló.

- Requiere un costoso y muy frecuente mantenimiento: los sellos tienen que reemplazarse por unos nuevos cada vez que se realiza un estudio.

Debido al elevado costo del equipo D.B. Robinson, a la escasez en el mercado de estos sistemas, y a la falta de uno que se adecue a los parámetros (temperatura, presión y viscosidad) que posee el crudo pesado de nuestro país, que se hace necesario el desarrollo propio de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados, equipo que debe contar con un sistema de agitación eficiente.

## **1.2. Planteamiento del Problema**

La viscosidad, definida como el coeficiente de la tensión de cizalladura y la velocidad de deformación (Perry y Green, 2001), da una medida de la resistencia que tiene un fluido a derramarse o fluir a través de un conducto. En tal sentido, la viscosidad a la temperatura de yacimiento es una de las características más importantes del petróleo, ya que indica la dificultad que presenta el crudo a ser extraído, transportado, tratado y analizado. Con referencia a esta característica, los crudos pesados son considerados los petróleos densos y viscosos, por los altos valores que exhiben de estas dos propiedades en comparación con los crudos medianos y livianos.

El desarrollo de sistemas PVT libres de mercurio para crudos medianos, livianos, volátiles y condensados ha sido posible debido a que la relativamente baja viscosidad de estos hidrocarburos no representa un problema para la agitación de la muestra, necesaria durante los estudios PVT. Sin embargo, éste no es el caso de los crudos pesados, ya que su alta viscosidad dificulta en gran manera su agitación.

PDVSA, a través de Intevep, está promoviendo el desarrollo de un equipo para la realización de los estudios PVT libres de mercurio en crudos pesados, lo cual demanda el diseño y la construcción de un sistema que garantice la agitación eficiente del fluido de muestra. Para tal fin, el sistema de agitación debe ser capaz de operar adecuadamente con fluidos con viscosidades de hasta 6.000 cP (el agua tiene aproximadamente 1 cP). Si bien a condiciones de yacimiento, el crudo pesado

venezolano frecuentemente tiene una viscosidad entre 500 y 2.500 cP, durante los estudios PVT se ha observado que la viscosidad de algunos crudos puede llegar a valores por el orden de 6.000 cP.

El sistema de agitación estará completa o parcialmente dentro de la celda PVT, por lo cual, su diseño debe considerar las condiciones de trabajo (presión y temperatura) a las que se someterá la celda; estas condiciones corresponden a presiones de hasta 5.000 psi y temperaturas de hasta 200 °F, aproximadamente.

Una consideración importante a tener en cuenta en el diseño del sistema de agitación, es que éste debe permitirle a la celda girar 180°, ya que se busca acelerar la homogeneización de las fases del fluido en el proceso de devolver la muestra a su estado inicial (monofásico) luego de finalizado un ensayo PVT (pues el fluido queda en estado bifásico). De esta forma, la muestra queda lista para un nuevo ensayo en un menor tiempo.

El volumen inicial de la muestra de fluido que manejará la celda se estima en 600 cc; en consecuencia, este valor también corresponde al volumen con el que debe trabajar el sistema de agitación. Por otra parte, la geometría de este sistema debe ser tal que permita un práctico ensamblaje y desarmado de sus componentes, para facilitar un mantenimiento cómodo y esporádico.

Adicionalmente, se busca obtener un sistema de agitación que en comparación con el del equipo D.B. Robinson: (a) disminuya el tiempo de homogeneización de las fases del fluido, con el fin de reducir el tiempo de duración de las pruebas; y (b) reduzca o en lo posible elimine los problemas de fuga de muestra, para así evitar perder parte de la certeza del estudio.

### **1.3. Objetivo General**

El objetivo del Trabajo Especial de Grado es efectuar el diseño y la construcción del sistema de agitación de un Equipo Libre de Mercurio que realiza estudios PVT en crudos pesados.

#### **1.4. Objetivos Específicos**

Los siguientes son los objetivos específicos establecidos para el presente trabajo:

- Analizar las actividades, ensayos y equipos de los laboratorios de la Pericia de Propiedades de los Fluidos de Yacimiento de PDVSA Intevep.
- Comparar el funcionamiento del sistema de agitación del equipo PVT libre de mercurio para crudos pesados con el del equipo PVT con mercurio para crudos pesados, existentes en PDVSA Intevep, estableciendo ventajas y desventajas.
- Definir los requerimientos que debe cumplir el sistema de agitación.
- Proponer un diseño del sistema de agitación que cumpla satisfactoriamente con los requerimientos establecidos.
- Evaluar el diseño del sistema de agitación y rediseñar los componentes del sistema que la evaluación sugiera.
- Elaborar un prototipo del sistema de agitación y colocarlo a prueba, monitoreando su comportamiento.

#### **1.5. Alcances**

Los alcances que se proponen son los siguientes:

- Obtener un sistema de agitación capaz de trabajar satisfactoriamente con crudos pesados.
- Obtener conocimiento en cuanto a las pruebas que se realizan en el Laboratorio de Propiedades de los Fluidos de Yacimiento de PDVSA Intevep.
- Aprender y aplicar los diversos programas computacionales que se requieran para el diseño y análisis del sistema de agitación.

## CAPÍTULO II: MARCO REFERENCIAL

En este capítulo se presenta toda la información teórica sobre la que se fundamenta el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

### 2.1. Comportamiento de Fases de los Fluidos de Yacimientos

Un yacimiento de hidrocarburos se define como una formación de rocas permeables y porosas que contiene una acumulación de hidrocarburos (petróleo o gas) confinada por rocas impermeables y/o barreras de agua (Bradley, 1992).

Los fluidos de los yacimientos de hidrocarburos son mezclas naturales de gas y petróleo que existen en el yacimiento a temperaturas y presiones elevadas. Su composición típica incluye cientos o miles de hidrocarburos y unos pocos no hidrocarburos (nitrógeno, dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno) (Whitson y Brule, 2000).

El comportamiento de una mezcla de hidrocarburos a condiciones de yacimientos y superficie depende principalmente de su composición química y de las condiciones de temperatura y presión. Este comportamiento es la primera consideración en el desarrollo y gerencia de yacimientos, afectando todos los aspectos de la exploración y producción de petróleo (Whitson y Brule, 2000; Danesh, 1998).

La temperatura del yacimiento puede ser asumida constante en un yacimiento dado o como una débil función de la profundidad. A medida que el gas y el petróleo son producidos, la presión del yacimiento decrece y la mezcla de hidrocarburos remanente cambia en composición, propiedades volumétricas y propiedades de fase. De esta forma, el estado del sistema va variando con la presión (Whitson y Brule, 2000).

Para expresar las condiciones bajo las cuales existen los yacimientos se utilizan los *diagramas de fases presión-temperatura*. En la Figura 2 se presenta un típico diagrama de fases de los fluidos de yacimiento en función de la presión y de la

temperatura; en este diagrama se puede observar: (a) el punto crítico, que para una mezcla multicomponente se refiere al estado de presión y temperatura en el cual todas las propiedades intensivas de la fase líquida y la fase gaseosa coinciden (ambas fases se encuentran en equilibrio) -punto C-; (b) las líneas de isocalidad, que son líneas dentro de la envolvente que convergen en el punto crítico y que unen puntos de igual porcentaje volumétrico de líquido en la mezcla líquido-gas; (c) la curva del punto de burbuja, línea que separa la región líquida de la región bifásica -línea de isocalidad de 100%-; (d) la curva del punto de rocío, línea que separa la región gaseosa de la región bifásica -línea de isocalidad de 0%-; y (e) la región bifásica, zona donde coexisten la fase líquida y gaseosa en equilibrio, delimitada por la curva del punto de burbuja y la curva del punto de rocío (Tarek, 2000). La forma del diagrama de fases y la posición del punto crítico determinan el comportamiento de un fluido de yacimiento durante la producción (McCain, 1990).

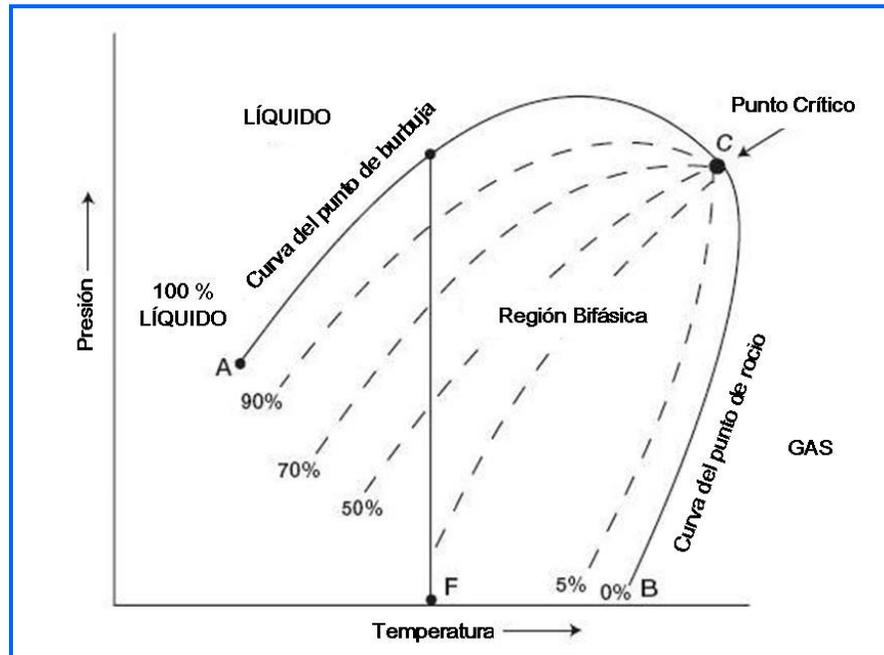


Figura 2. **Diagrama de fases para una mezcla de hidrocarburos.** Tomada de Reservoir engineering handbook (p.2) por Tarek, 2000, Texas: Gulf Publishing Company. Modificaciones de los autores.

Los yacimientos se pueden clasificar de acuerdo al estado inicial (gaseoso o líquido) en que se encuentra la mezcla de hidrocarburo en el mismo, en: yacimientos

de gas y yacimientos de petróleo. De acuerdo a la localización de la temperatura del yacimiento respecto a las temperaturas crítica y cricondentérmica; y por la localización de la temperatura y presión de la primera etapa del separador con respecto al diagrama de fases del fluido de yacimiento, a su vez se subclasifican en yacimientos de: gas seco, gas húmedo, gas condensado, petróleo volátil y petróleo negro (Whitson y Brule, 2000). En la Figura 3 se presenta un esquema de la clasificación de los yacimientos de hidrocarburos.

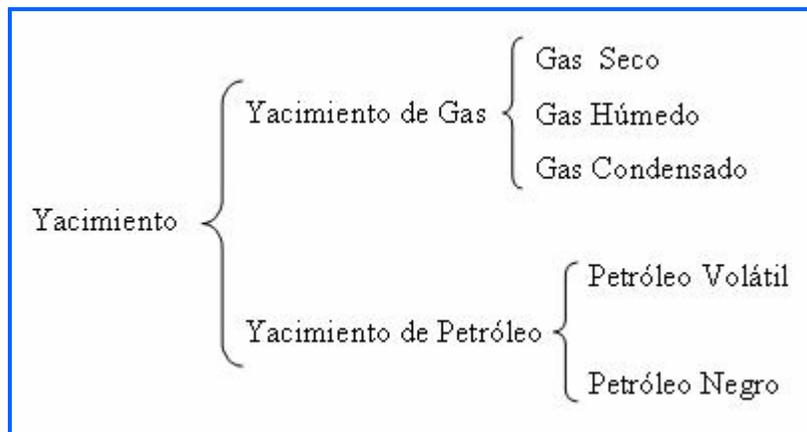


Figura 3. Esquema de clasificación de los yacimientos de hidrocarburos.

### 2.1.1. Yacimiento de Petróleo

Esta clase de yacimientos se encuentran ubicados a la izquierda del punto crítico, ya que poseen una temperatura menor que la temperatura crítica. Este fluido contiene gas disuelto, que al decrecer la presión por debajo del punto de saturación, se comienza a liberar originando dos fases (líquido y gas), hasta que se alcanza el equilibrio entre ellas (Crotti y Bosco, 2001).

#### 2.1.1.1. Yacimientos de Petróleo Volátil

El petróleo volátil es una mezcla que contiene menos moléculas pesadas y más intermedias en comparación con el petróleo negro, con una relativamente alta

relación gas-petróleo. Estos yacimientos tienen una temperatura menor, pero cercana, a la temperatura crítica, y experimentan grandes cambios en sus propiedades cuando la presión es reducida por debajo del punto de burbuja (Whitson y Brule, 2000; Danesh, 1998).

2.1.1.2. Yacimientos de Petróleo Negro

El petróleo negro es una mezcla de hidrocarburos con una considerable cantidad de moléculas pesadas y el cual existe en estado líquido a las condiciones de yacimiento (Crotti y Bosco, 2001). Las propiedades de los petróleo negros, a diferencia de los petróleos volátiles, exhiben cambios graduales con una dependencia casi lineal de la presión por debajo del punto de burbuja (Danesh, 1998). En la Figura 4 se presenta el diagrama de fases típico del petróleo negro.

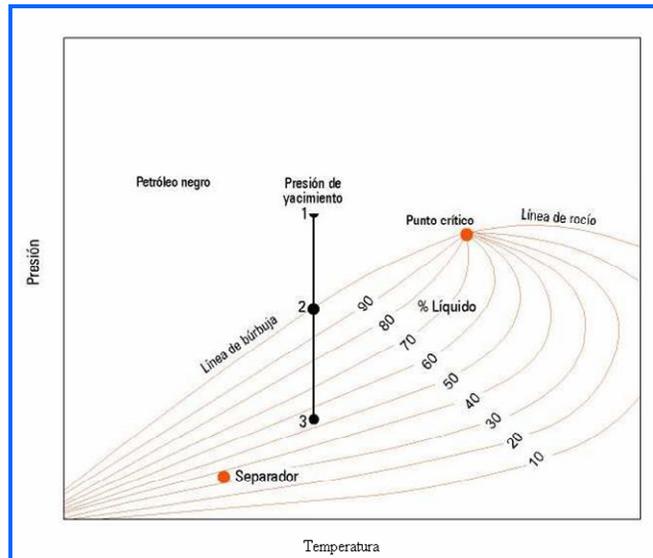


Figura 4. **Diagrama de fases del petróleo negro.** Tomada de The properties of petroleum fluids (p.150) por McCain, 1990, Estados Unidos: Penwell. Modificaciones de los autores.

Los yacimientos de petróleo negro se clasifican según su fluidez, representada indirectamente por la gravedad API (que emplea como parámetro de comparación el agua, cuya gravedad API es 10 °API a 60 °F), teniendo que a mayor °API mayor es la

fluidez del petróleo (Barberii, 1998). En la Tabla 1 se presenta la clasificación de los petróleos negros según su gravedad API (a 60 °F).

Tabla 1. Clasificación UNITAR del petróleo negro según su gravedad API.

Tipo de crudo	Gravedad [°API]
Livianos	$30 < ^\circ API \leq 40$
Medianos <sup>a</sup>	$20 < ^\circ API \leq 30$
Pesados <sup>a</sup>	$10 < ^\circ API \leq 20$
Extra Pesados	$^\circ API < 10$

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de *Actualización en ingeniería de yacimientos*. Módulo III (p.I-12) por G. Rojas, s.f., Caracas: Centro Internacional de Educación y Desarrollo (CIED), Filial de PDVSA.

<sup>a</sup>El Ministerio de Energía y Minas de Venezuela usa 21,9 en vez de 20 para delimitar los crudos medianos y pesados.

## 2.2. Estudio de las Propiedades de los Fluidos de Yacimientos: Estudios PVT

Mediante el estudio de las propiedades termodinámicas y físicas de los fluidos del yacimiento se puede predecir el comportamiento de fases de los hidrocarburos, tanto a condiciones de yacimiento, como a las diferentes condiciones en que se puedan encontrar durante su producción, separación y transporte. Con esta información se puede: (a) plantear una apropiada gerencia de los yacimientos; (b) evaluar las reservas; (c) desarrollar un plan óptimo de recobro; (d) determinar la cantidad y calidad del fluido producido; y (e) fijar las condiciones óptimas de trabajo y el esquema ideal de producción (Danesh, 1998).

Los mecanismos naturales de producción de los yacimientos se basan en el empuje que ejerce la presión natural del yacimiento sobre los hidrocarburos, para desplazarlos desde el yacimiento hasta los pozos y desde el fondo de éstos hacia la superficie. De esta forma se produce agotamiento en la presión del yacimiento a medida que el fluido es extraído. Como la temperatura del yacimiento permanece prácticamente constante, la principal variable que determina el comportamiento de los fluidos, bajo condiciones de yacimiento es la presión. (Barberii, 1998; Danesh, 1998).

Lo expuesto anteriormente conlleva a que una prueba PVT, en rasgos generales, consista en simular en el laboratorio el agotamiento volumétrico e isotérmico de la

presión de un yacimiento con el fin de determinar el comportamiento de fases y las propiedades del fluido de yacimiento (Danesh, 1998). El término *PVT* se emplea debido a que estos estudios determinan la relación entre presión, volumen y temperatura para una mezcla de hidrocarburos en particular (Bánzer, 1996).

Durante las pruebas PVT, la reducción en la presión por debajo del punto de saturación del fluido de muestra (punto de burbuja o punto de rocío según sea el caso) provoca la formación de una segunda fase (excepto en mezclas de gas seco y húmedo). En el caso de una muestra de petróleo, se libera en forma de burbujas el gas asociado a éste, coexistiendo de esta manera la fase líquida y la gaseosa. Cuando para alcanzar el equilibrio de estas fases se utiliza un sistema de agitación que agilice el proceso, a las pruebas se les llama *Pruebas Convencionales*, de lo contrario se les conoce como *Pruebas No Convencionales* (Danesh, 1998).

Los estudios PVT tienen lugar en celdas, las cuales son básicamente recipientes a presión que permiten la medición de diversos parámetros (presión, temperatura y volumen de muestra) y deben estar diseñadas para trabajar adecuadamente bajo las condiciones exigidas. Dichas celdas son parte de un sistema (horno, bombas, instrumentación, entre otras) con el cual se simulan las condiciones del fluido (presión y temperatura) a lo largo de la vida productiva del yacimiento y cuando es llevado desde el fondo del pozo hasta los separadores en la superficie.

La muestra que se utilice para realizar los estudios PVT tiene que ser representativa del fluido original del yacimiento, por lo tanto debiera obtenerse al inicio de la producción, antes de que ocurra una apreciable caída de presión del yacimiento, o al menos cuando la presión sea mayor o igual a la de burbuja del crudo original (Rojas, s.f.).

### ***2.2.1. Estudios de las Propiedades del Petróleo Negro***

Las pruebas de laboratorio usadas para obtener el comportamiento PVT deben representar los tipos de liberación gas-petróleo que ocurren durante el flujo de

petróleo desde el yacimiento hasta los separadores en superficie. Estos tipos de liberación son: instantánea y diferencial (Rojas, s.f.).

La liberación instantánea se da cuando un crudo no ha liberado la cantidad de gas suficiente para que éste inicie su movimiento a través de los canales porosos del yacimiento, por lo que el gas liberado permanece en contacto con el crudo sin ocurrir cambio de la composición total del sistema en un volumen de control dado. Por su parte, cuando la movilidad del gas ocasiona que la fase gaseosa se desplace hacia el pozo a una tasa de flujo mayor que la fase líquida, la composición total del sistema en un volumen de control dado cambia, ocurriendo así la liberación diferencial (Rojas, s.f.).

En la tubería de producción, líneas de flujo y separadores las fases gas y líquido se mantienen en contacto, sin cambio apreciable de la composición total del sistema y en agitación permanente lo cual permite el equilibrio entre las fases. Bajo estas condiciones, la liberación es del tipo instantánea (flash) (Rojas, s.f.).

Son cinco los procedimientos principales que se llevan a cabo en las celdas PVT para el estudio convencional de las propiedades del petróleo negro (Rojas, s.f.):

- Proceso de liberación instantánea flash.
- Prueba de expansión a composición constante.
- Proceso de liberación diferencial.
- Pruebas de separadores.
- Estudio de viscosidad.

#### *2.2.1.1. Proceso de Liberación Instantánea Flash*

A. Borges (Gerente Técnico de Esquemas de Explotación, profesional con más de 20 años de servicio en el área de caracterización de los fluidos de yacimiento), plantea que este proceso simula el comportamiento del fluido como si éste fuera llevado directamente desde las condiciones de yacimiento hasta las condiciones de tanque (atmosféricas). En la liberación flash se remueve un cierto volumen de gas producto de un cambio súbito de presión y temperatura. La prueba se inicia con la

muestra dentro de la celda a condiciones por encima o iguales al punto de burbuja. Luego, se permite la salida de un determinado volumen de muestra a condiciones atmosféricas, mientras la presión dentro de la celda es mantenida constante por la reducción de su volumen. El líquido es depositado en un recipiente (vial) y el gas asociado a éste se desprende y es enviado a un gasómetro donde se contabiliza su volumen. Esta prueba es de gran importancia, ya que permite determinar la composición del fluido de muestra y la relación gas-petróleo en solución ( $R_s$ ). De esta prueba además se puede obtener el factor volumétrico del petróleo ( $B_o$ ) y la gravedad API del petróleo de tanque (entrevista personal, Septiembre 19, 2006). En la Figura 5 se presenta un proceso de liberación flash.

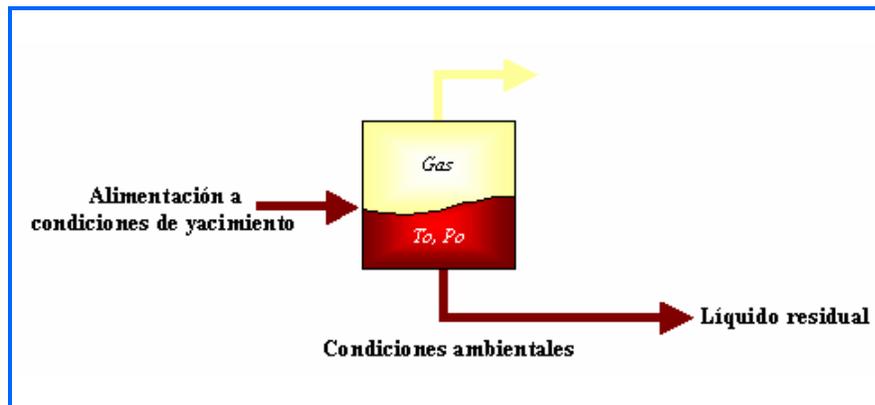


Figura 5. **Proceso de liberación flash para petróleo negro.** Tomada de Estado del arte de sistemas PVT libres de mercurio para crudos pesados y extrapesados (p.4) por Sastoque, Borges, Tavera y Hernández, en imprenta, Los Teques: PDVSA Intevep.

#### 2.2.1.2. Prueba de Expansión a Composición Constante

Es una prueba de liberación instantánea donde la muestra original es sometida a un proceso de expansión a composición y temperatura constante (igual a la temperatura de la muestra en el yacimiento), manteniendo el gas liberado en contacto con el crudo (Rojas, s.f.). Para ello, se toma una muestra de petróleo y se coloca en una celda a una temperatura fija igual a la temperatura de yacimiento y a una presión mayor o igual a la presión inicial del yacimiento, para garantizar el estado monofásico de la muestra. Luego, la presión es reducida por etapas, en cada una de

las cuales el volumen es medido. Tan pronto se alcanza la presión de burbuja ( $P_b$ ) se libera gas del crudo y la compresibilidad total del sistema aumenta significativamente. La celda es agitada regularmente para asegurar que el contenido éste en equilibrio (McCain, 1990; Whitson y Brule, 2000).

Como la prueba se realiza a composición constante no se remueve ni líquido ni gas de la celda, por lo tanto, cuando la presión se encuentre por debajo del punto de burbuja el volumen medido incluirá tanto el gas como el líquido (McCain, 1990). De esta prueba se obtienen las siguientes propiedades del crudo: presión de burbuja, volumen relativo en función de la presión ( $V/V_b$ ) y compresibilidad del petróleo ( $C_o$ ) (Rojas, s.f.). En la Figura 6 se presenta un esquema de la prueba de expansión a composición constante.

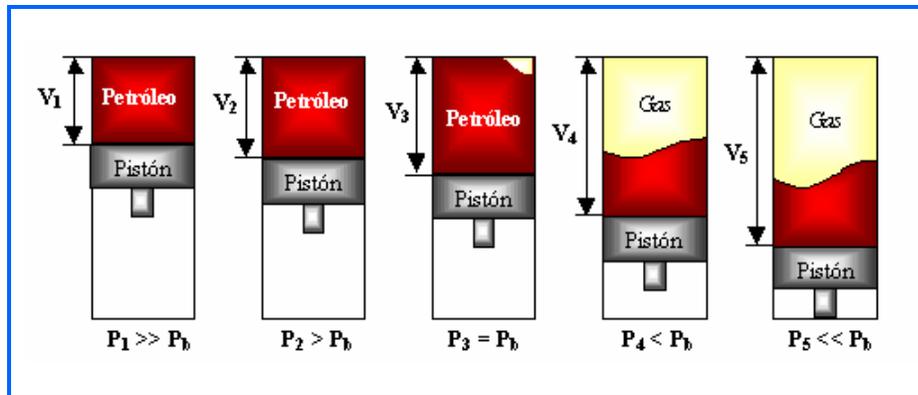


Figura 6. **Prueba de expansión a composición constante para petróleo negro.** Tomada de Estado del arte de sistemas PVT libres de mercurio para crudos pesados y extrapesados (p.8) por Sastoque, Borges, Tavera y Hernández, en imprenta, Los Teques: PDVSA Intevep.

En la Figura 7 se observa la gráfica del volumen relativo en función de la presión. Para los petróleos negros la discontinuidad en el volumen del punto de burbuja es aguda, y la presión y el volumen del punto de burbuja son fácilmente leídos por la intersección de las líneas de tendencia de la región monofásica (fluido incompresible) y bifásica; los petróleos volátiles no exhiben la misma clara discontinuidad en las propiedades volumétricas a la presión de burbuja (Parlaktuna, 2004).

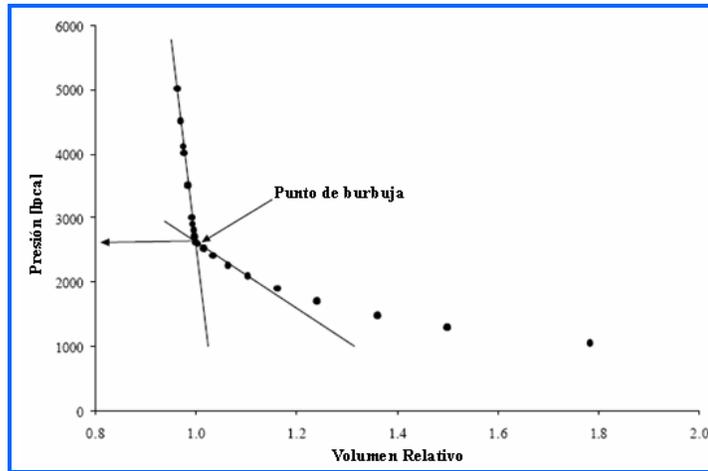


Figura 7. Comportamiento del volumen relativo en función de la presión durante una prueba de expansión a composición constante de petróleos negros. Tomada de Hydrocarbon phase behavior (p. 54) por Parlaktuna, 2004, disponible: <http://wildcat.petc.metu.edu.tr/mahmut/pete517.html>. Modificaciones de los autores.

### 2.2.1.3. Proceso de Liberación Diferencial

Es un estudio de expansión a composición variable, en el cual se efectúa un proceso diferencial aproximado a través de una serie de separaciones instantáneas (en varias etapas) a la temperatura de yacimiento. Se inicia colocando una muestra de petróleo en la celda a una temperatura fija igual a la temperatura de yacimiento y a la presión de burbuja (ya que a  $P > P_b$  la liberación diferencial es igual a la instantánea). Se expande la muestra hasta una presión inferior a la de burbuja y se agita la celda para asegurar el equilibrio gas-líquido. El gas liberado es desplazado de la celda mientras la presión se mantiene constante reduciendo el volumen de la celda. Luego, se contabiliza a condiciones atmosféricas el gas colectado y se mide el volumen de líquido remanente en la celda. Este petróleo remanente, el cual es un líquido saturado con menor contenido de gas que el original, es expandido de nuevo a una menor presión. Este procedimiento se repite hasta alcanzar la presión atmosférica, luego de lo cual, se reduce la temperatura de la muestra a 60 °F y se mide el volumen del líquido remanente. De esta prueba se pueden obtener las siguientes propiedades: relación gas-petróleo en solución ( $R_{sd}$ ), factor volumétrico del petróleo ( $B_{od}$ ), factor volumétrico total ( $B_{td}$ ), densidad del petróleo ( $\rho_{od}$ ), factor de compresibilidad del gas

( $z$ ), factor volumétrico del gas ( $B_g$ ), gravedad específica del gas ( $\gamma_g$ ) y gravedad API del petróleo residual (Rojas, s.f.; McCain, 1990). En la Figura 8 se presenta un esquema del proceso de liberación diferencial.

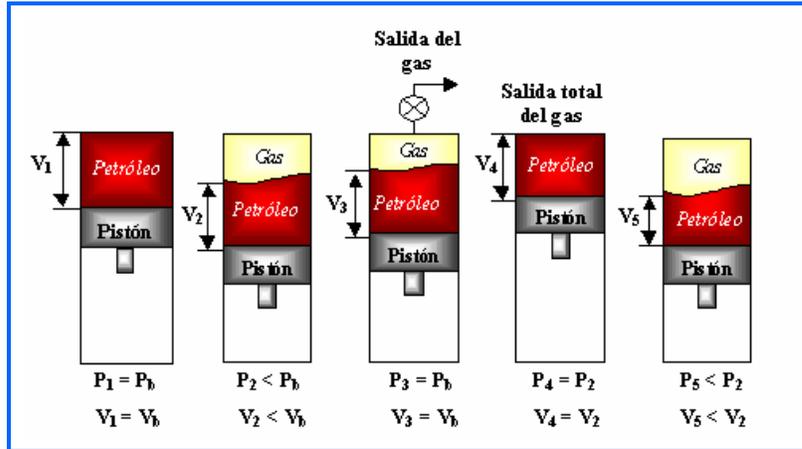


Figura 8. **Proceso de liberación diferencial para petróleo negro.** Tomada de Estado del arte de sistemas PVT libres de mercurio para crudos pesados y extrapesados (p. 9) por Sastoque, Borges, Tavera y Hernández, en imprenta, Los Teques: PDVSA Intevep.

#### 2.2.1.4. Pruebas de Separadores

Son pruebas de liberación flash que se realizan con el objeto de cuantificar el efecto de las condiciones de separación (presión y temperatura) en superficie sobre las propiedades del crudo ( $B_o$  y  $R_s$ ), para así escoger las condiciones de separación que maximicen la producción en el tanque de almacenamiento (crudo de mayor gravedad API), es decir, la presión y temperatura a la cual se produce la menor cantidad de gas y por ende la mayor cantidad de líquido (Whitson y Brule, 2000). La prueba se inicia colocando la muestra dentro de la celda a condiciones de saturación (temperatura de yacimiento y presión del punto de burbuja), después, la muestra se hace pasar por un sistema de separadores de laboratorio de múltiples etapas (comúnmente de una a tres etapas). La presión y temperatura en cada separador son fijadas para representar las condiciones actuales o deseadas de los separadores de campo. El gas liberado en cada etapa es removido y su volumen medido a condiciones atmosféricas; el petróleo remanente en la última etapa (representando

ésta las condiciones de tanque) también es medido. De esta prueba se obtienen, para cada una de las presiones de separador, los siguientes parámetros: relación gas-petróleo en solución a la presión de burbuja ( $R_{sfb}$ ), factor volumétrico del petróleo a la presión de burbuja ( $B_{ofb}$ ), gravedad API del petróleo de tanque y la composición del gas separado (Rojas, s.f.). En la Figura 9 se presenta un esquema del proceso de separación flash en tres etapas.

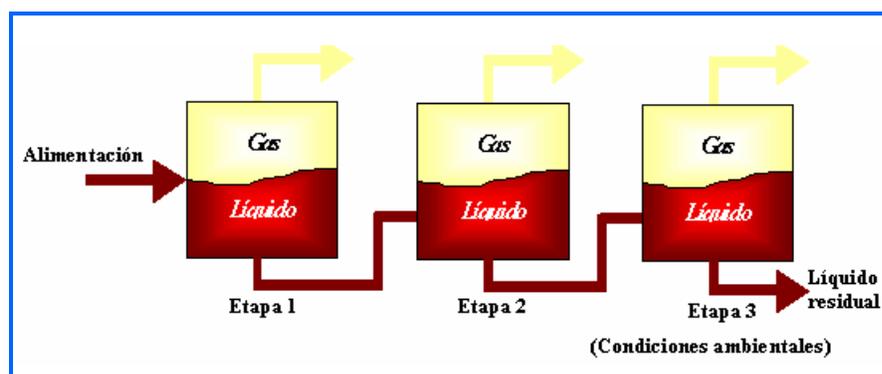


Figura 9. **Prueba de separadores en tres etapas para petróleo negro.** Tomada de Estado del arte de sistemas PVT libres de mercurio para crudos pesados y extrapesados (p.10) por Sastoque, Borges, Tavera y Hernández, en imprenta, Los Teques: PDVSA Intevep.

#### 2.1.1.5. Estudio de Viscosidad

La viscosidad del petróleo se determina dentro de los equipos para el análisis PVT mediante un viscosímetro. Ésta puede medirse a diferentes presiones y temperaturas. El líquido utilizado para la medición de la viscosidad es el remanente después de remover el gas para una presión dada (McCain, 1990).

### 2.3. Agitación

La agitación ha sido practicada desde tiempos antiguos, cuando aparecieron los primeros contenedores de líquidos. Este proceso es uno de los más importantes dentro de la industria química, porque el éxito de muchas operaciones industriales depende de que se lleve a cabo correctamente. Sin embargo, debido a la complejidad de los

fenómenos de transporte involucrados, es uno de los procesos más difíciles de analizar y caracterizar (Hauke, Vidal y Blasco, s.f.; Brodkey y Hershey, 1988).

### ***2.3.1. Definición y Características de la Agitación***

En términos generales, la agitación consiste en inducir movimiento (generalmente por medios mecánicos) a un fluido, con el objeto de incrementar el transporte de materia o la transferencia de calor en el mismo (Hauke, Vidal y Blasco, s.f.). La tasa de transferencia de calor se eleva debido a que la agitación acelera la interacción de las moléculas de alta energía cinética con las de baja energía, mientras que el incremento en la tasa de transferencia de masa ocurre por el propio estado de movimiento al que se someten las partículas del fluido. Pero dentro de un proceso, la agitación no sólo puede originar incrementos en las tasas de transporte (transferencia de masa, transferencia de calor y transferencia de momento), sino que además puede dar lugar a cambios físicos y químicos dentro de las fases involucradas, lo cual puede ocurrir de forma simultánea o aislada. (Brodkey y Hershey, 1988).

En el caso de la agitación mecánica, el fluido se encuentra contenido dentro de un recipiente, y mediante la fuerza aplicada por un impulsor en movimiento se mantiene un patrón de flujo en el fluido. Este patrón permite el intercambio de fluido entre diferentes zonas del recipiente; de modo que si las propiedades del fluido no son las mismas en estas zonas, el intercambio reduce la diferencia de las propiedades, haciendo al fluido más uniforme (Uhl y Gray, 1966a).

### ***2.3.2. Fuerzas Involucradas***

El mecanismo por el cual se transmite la energía desde el impulsor hacia el fluido es similar al de un fluido entre dos placas paralelas; ya que al encontrarse el impulsor rotando, mientras que los lados y fondo del recipiente permanecen estacionarios, se generan, por efecto de la viscosidad, gradientes de velocidad en el fluido (Brodkey y Hershey, 1988).

En sistemas bifásicos, las fuerzas de inercia y cortantes son las responsables de la reducción de tamaño de las partículas de la fase dispersa, con el consecuente incremento del área interfacial. A medida que se elevan las velocidades del fluido, son mayores las fuerzas de inercia y cortantes, y se producen partículas más pequeñas. Se pueden disgregar partículas aglomeradas suspendidas en un líquido, interdispersar líquidos inmiscibles y dispersar gases en líquidos por acción de estas fuerzas (Uhl y Gray, 1966a).

### ***2.3.3. Régimen Laminar y Turbulento***

La agitación constituye un excelente caso de flujo de fluidos, y como tal, ocurre bajo un régimen de flujo laminar, transicional o turbulento (Brodkey y Hershey, 1988). En la agitación laminar, el movimiento que induce una capa de fluido sobre otra adyacente ocasiona que se estiren, y por lo tanto esparzan, los grupos de elementos de fluido. Debe tratarse de evitarse este régimen en operaciones de mezclado y dispersión, debido al deficiente nivel de homogeneización que se obtiene (Uhl y Gray, 1966a).

Las fuerzas viscosas a través de la superficie del impulsor proveen las condiciones necesarias para la agitación en régimen turbulento a altos números de Reynolds. Grandes vórtices o remolinos se originan de la interacción del flujo con la frontera (superficie del impulsor), y tanto las magnitudes de velocidad presentes como el movimiento desordenado de las partículas de fluido intensifican el efecto de la agitación (Uhl y Gray, 1966a).

### ***2.3.4. Mecanismos de Transporte de Materia***

La masa de un material se propaga a través de otro mediante tres procesos de difusión: difusión de lote, difusión molecular y difusión de remolino. Cuando un fluido se pone en contacto con algún otro, el régimen de flujo presente, sea laminar o turbulento, da lugar al esparcimiento a gran escala de la masa de uno de los fluidos a

través del otro; proceso que se conoce como *difusión de lote* o *convección*. La difusión referida al movimiento relativo de las moléculas, como consecuencia de una diferencia de concentración de las clases de moléculas se denomina *difusión molecular*. Por su parte, la *difusión de remolino* brinda mayor área de contacto (área interfacial) para la difusión molecular, ya que consiste en la desintegración repetida de grupos de moléculas inestables (remolinos), formados bajo condiciones turbulentas, en varios grupos más pequeños, hasta finalmente disipar toda su energía y alcanzar el menor tamaño posible (Uhl y Gray, 1966a).

Cualquiera sea el régimen de flujo existente la difusión molecular está siempre presente; no obstante, el proceso de difusión molecular por sí solo generalmente no es suficiente para satisfacer las necesidades de los procesos en la actualidad. En flujo laminar, a la difusión molecular se le sobrepone la difusión de lote; mientras que en agitación turbulenta se sobreponen los tres procesos de difusión, predominando los mecanismos de flujo turbulento, luego la difusión por remolinos, y finalmente la difusión molecular (Brodkey y Hershey, 1988; Uhl y Gray, 1966a).

### **2.3.5. Vórtices**

Siempre que una partícula de fluido viaje en una trayectoria circular, a dicha trayectoria se le designa como un *vórtice*. En agitación, el término vórtice se usa para referirse a dos fenómenos de flujo principales: (a) los sistemas de vórtices cerca de las hojas del impulsor, asociados con el flujo turbulento local; y (b) el vórtice formado en el centro de un recipiente debido al movimiento del impulsor (Brodkey y Hershey, 1988).

Al formarse el vórtice central, Figura 10, el fluido simplemente rota como un todo alrededor del recipiente, con poco corte entre el impulsor y las capas de fluido adyacentes. El fenómeno de vórtice es indeseado en muchas de las operaciones de agitación por varias razones. En primer lugar, aunque el fluido se mueve alrededor del recipiente ocurre muy poco mezclado entre las capas de fluido adyacentes, debido a que el impulsor y el fluido se están moviendo a casi la misma velocidad angular.

Segundo, si la velocidad de giro es tal que el vórtice alcanza al impulsor, el aire por encima de la superficie del líquido puede ser arrastrado dentro del mismo, trabajando el impulsor parcialmente en el aire, tal como se aprecia en la Figura 10; en muchos procesos este fenómeno implicaría contaminación del fluido con aire. En tercer lugar, la formación del vórtice eleva el nivel del líquido en los bordes del recipiente, pudiendo derramarse; no obstante, en aplicaciones de formación de emulsiones y suspensiones de sólidos, un vórtice central puede ser beneficioso para sumergir la fase dispersa (Brodkey y Hershey, 1988; Treybal, 1998).

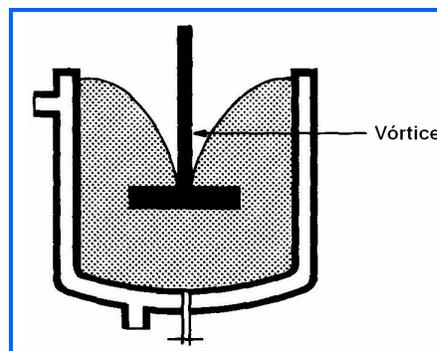


Figura 10. **Fenómeno de vórtice central.** Tomada de Transport phenomena: a unified approach (p.370) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company. Modificaciones de los autores.

### 2.3.6. Patrones de Flujo

El tipo de flujo que se produce en un tanque agitado depende del tipo de impulsor, características del fluido, proporciones del tanque, presencia o no de mamparas (explicadas en la sección 2.3.7.2), velocidad del impulsor, entre otras. La velocidad del fluido en un punto del tanque tiene tres componentes, y el tipo de flujo global en el mismo depende de las variaciones de estas tres componentes de un punto a otro. La primera componente de velocidad es radial y actúa en dirección perpendicular al eje del impulsor; la segunda es longitudinal o axial, y actúa en dirección paralela al eje; la tercera es tangencial y actúa en dirección tangencial a la trayectoria circular descrita por el impulsor. Para el caso corriente del eje del impulsor en posición

vertical, las componentes radial y tangencial están en un plano horizontal, mientras que la componente axial es vertical (MixMor, 2005).

Los patrones básicos de flujo de los impulsores en posición vertical son: axial y radial (Figura 11). Los impulsores que generan un patrón axial descargan su contenido en dirección paralela a su eje, ascendente o descendente, según el sentido de giro y de inclinación de las hojas. Cuando la descarga es descendente, el flujo al llegar al fondo del tanque se extiende, sube por las paredes y retorna hacia el impulsor, Figura 11(a). Por su parte, los impulsores que generan un patrón radial de descarga impulsan radialmente el fluido contra las paredes laterales del tanque, desde donde la corriente se divide, una parte fluye hacia arriba y otra parte hacia el fondo, retornando ambas al impulsor; de esta manera, se producen dos lazos de circulación separados, Figura 11(b) (Paul, Atiemo-Obeng y Kresta, 2004; MixMor, 2005).

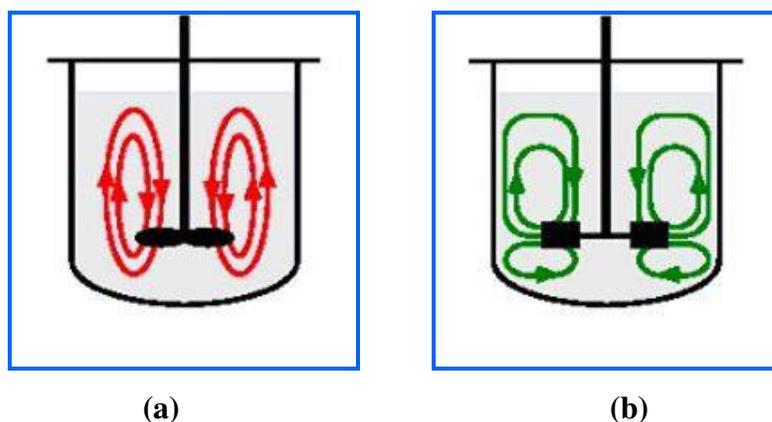


Figura 11. **Patrones de flujo de los impulsores: (a) Axial y (b) Radial.** Tomada de Estudio teórico experimental de la agitación por Ansó, Barge y Demming, (s.f.), disponible: [www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm](http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm).

Todos los impulsores producen alguna clase de patrón de flujo. Estos patrones, junto con el régimen de flujo, determinan niveles relativos de caudal y cortante producidos. Por consiguiente, todos los impulsores pueden ser categorizados a través de las variaciones en sus capacidades de caudal y cortante. Por ejemplo, en general los impulsores de flujo radial proveen alta cortante y poco caudal, mientras que los

impulsores axiales producen menos cortante pero circulan un mayor caudal (Paul y otros, 2004).

### 2.3.7. Equipamiento

La agitación normalmente se lleva a cabo en el interior de contenedores y tuberías; por lo general, a través de impulsores, chorros de líquidos o burbujas de gas (Uhl y Gray, 1966a). El equipo para agitación mecánica, Figura 12, usualmente consiste de un recipiente, uno o más impulsores, un motor y en diversas ocasiones mamparas de pared (Brodkey y Hershey, 1988).

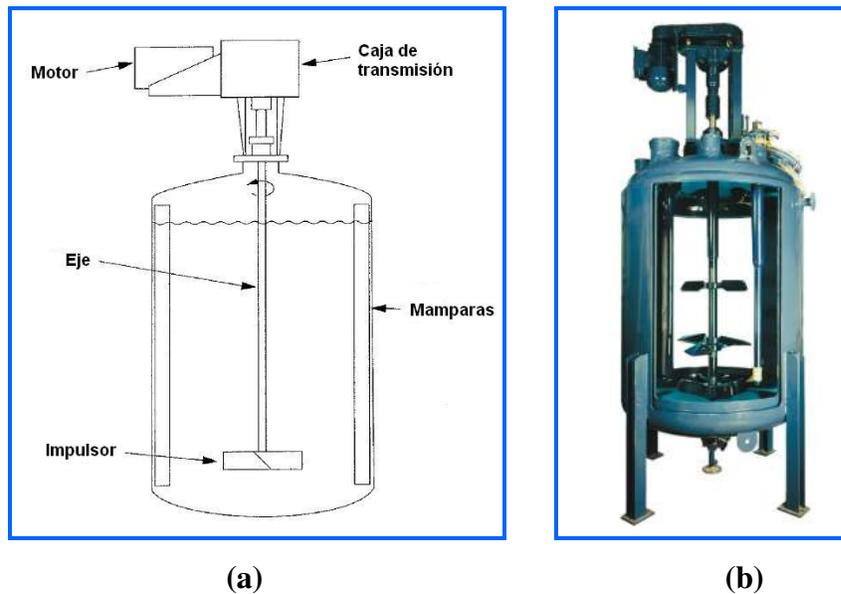


Figura 12. **Equipo de agitación mecánica: (a) Partes básicas y (b) Modelo industrial.** Figura 12(a) tomada de Handbook of industrial mixing: Science and practice (p. 348) por Paul, Atiemo-Obeng y Kresta, 2004, Estados Unidos: Wiley. Modificaciones de los autores. Figura 12(b) tomada de Post Mixing Optimization and Solutions, 2005, disponible: [www.postmixing.com](http://www.postmixing.com).

En la literatura, la agitación posee su propia nomenclatura; la Figura 13 muestra las variables geométricas que se definen a partir de los componentes de un recipiente de agitación estándar (Brodkey y Hershey, 1988).

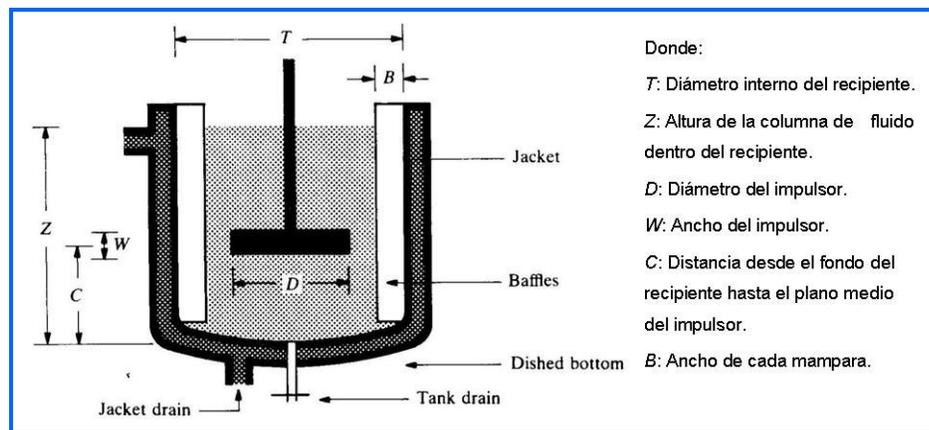


Figura 13. **Variables geométricas definidas en agitación mecánica.** Tomada de Transport phenomena: a unified approach (p. 364) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company. Modificaciones de los autores.

También, en la Figura 13 y Figura 14(a) se aprecia el impulsor colocado céntricamente con el recipiente. Existen otras configuraciones, por ejemplo: (a) propelas que entran por un lado del recipiente; (b) impulsores colocados excéntricamente -Figura 14(b)- o inclinados -Figura 14(c)-; (c) múltiples impulsores acoplados al mismo eje; y (d) múltiples impulsores con sus respectivos ejes distribuidos por el recipiente (Brodkey y Hershey, 1988).

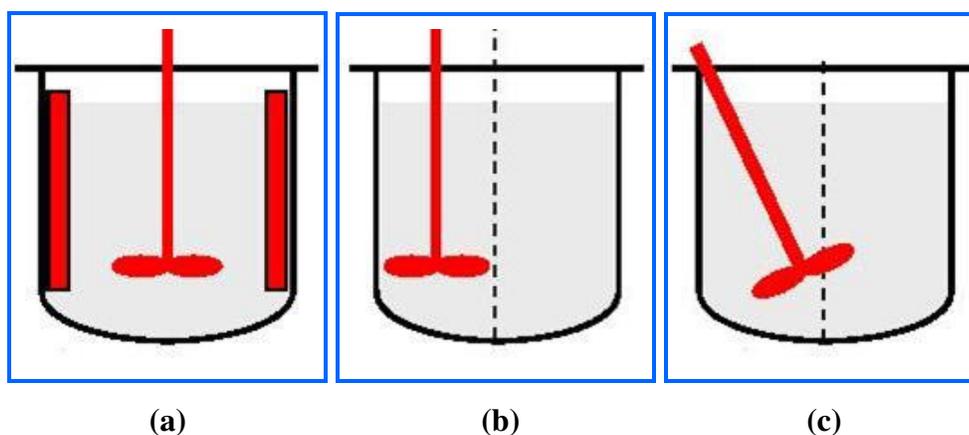


Figura 14. **Montaje del eje del impulsor:**(a) Céntrico; (b) Excéntrico e (c) Inclinado. Tomada de Estudio teórico experimental de la agitación por Ansó, Barge y Demming, (s.f.), disponible: [www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm](http://www.unizar.es/dctmf/jblasco/AFTAgitacion/index.htm).

El montaje excéntrico de los impulsores crea un patrón de flujo desbalanceado, que puede reducir o eliminar el vórtice y de esta manera incrementar el consumo de potencia, por lo que se considera como una alternativa frecuente frente a la instalación de mamparas en los recipientes (Uhl y Gray, 1966a).

### 2.3.7.1. Recipientes

Los recipientes para agitación son cilindros verticales, circulares, abiertos a la atmósfera o cerrados; los recipientes rectangulares son poco usuales. Algunas aplicaciones como suspensión de sólidos a menudo emplean recipientes con fondo cóncavo; otras usan recipientes con fondo inclinado o con fondo y lados formando un ángulo recto. En ocasiones, los recipientes están provistos de serpentines que rodean al impulsor (Figura 15), los cuales permiten la transferencia de calor hacia dentro y fuera del recipiente (Brodkey y Hershey, 1988; Treybal, 1998).

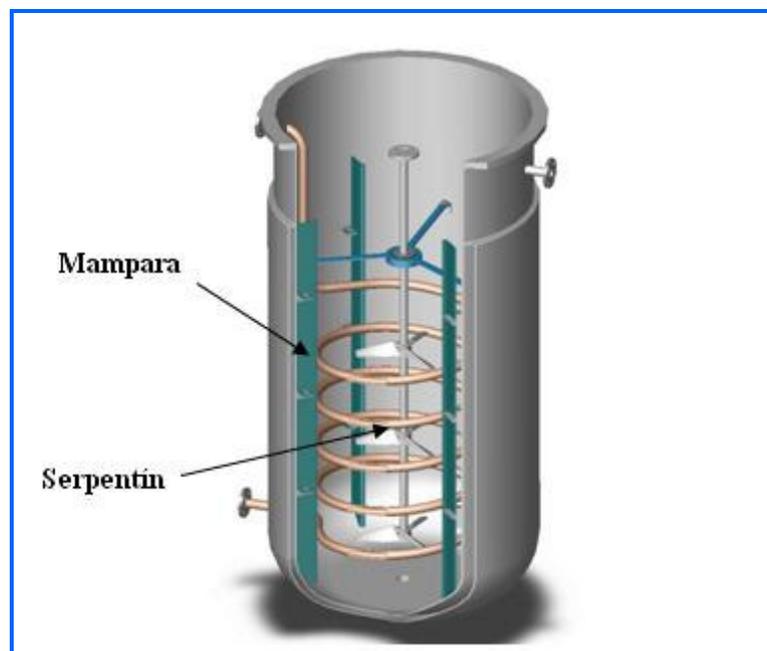


Figura 15. **Recipiente para agitación mecánica.** Tomada de Post Mixing Optimization and Solutions, 2005, disponible: [www.postmixing.com](http://www.postmixing.com). Modificaciones de los autores.

### 2.3.7.2. Mamparas

La Figura 15 muestra las mamparas, también llamadas *pantallas deflectoras*. En su forma básica son láminas delgadas, estrechas, y alargadas, que se adhieren perpendicularmente a las paredes internas del recipiente cuando se desea evitar la formación del vórtice central. Las mamparas actúan incrementando las velocidades axiales y radiales del fluido, mientras reducen grandemente las velocidades tangenciales (responsables del giro de la masa de fluido), con lo que se convierte flujo rotatorio en un patrón vertical de movimiento. Datos experimentales señalan que cuatro mamparas radialmente equiespaciadas proveen buen desempeño. En la práctica industrial se emplea un ancho para las mamparas de  $T/12$  o, con menos frecuencia  $T/10$ , y una separación de las paredes del tanque de alrededor de  $B/6$ ; esto último para evitar estancamiento de fluido. Cualquier objeto estacionario colocado fuera del eje de rotación del impulsor actuará como una mampara; un buen ejemplo son los serpentines (Figura 15) para transferencia de calor. Casi todas las aplicaciones industriales que incluyen agitación en la región turbulenta requieren la instalación de mamparas en el recipiente (Treybal, 1998; Uhl y Gray, 1966a).

### 2.3.7.3. Impulsores

El diseño del impulsor tiene gran influencia sobre el comportamiento de la agitación y el requerimiento de energía para el proceso. La Figura 16 muestra algunos diseños de impulsores para flujo turbulento y laminar; se puede notar que existe una dependencia del diseño según el régimen de flujo de la aplicación. Debido a que el flujo laminar no transporta momento tan efectivamente como el flujo turbulento, los impulsores para flujo laminar son normalmente tan grandes como el recipiente, con lo que se logra el efecto deseado en todas partes del mismo (Brodkey y Hershey, 1988).

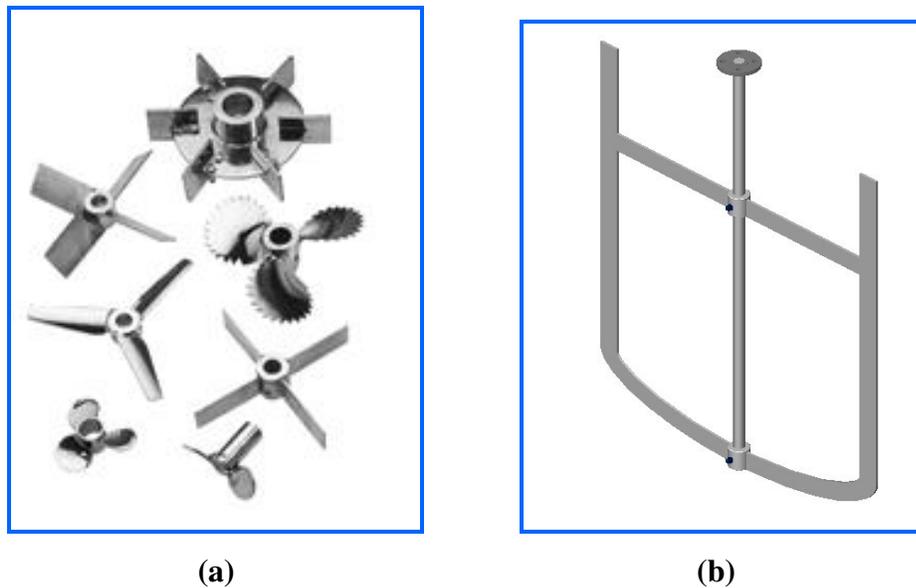


Figura 16. **Impulsores:** (a) **Para flujo turbulento** y (b) **Para flujo laminar**. Figura 16(a) tomada de MixMor, Incorporated, 2005, disponible: [www.agitadores.com](http://www.agitadores.com). Figura 16(b) tomada de Post Mixing Optimization and Solutions, 2005, disponible: [www.postmixing.com](http://www.postmixing.com).

La variedad de configuraciones de impulsores se puede agrupar en cinco categorías: propelas, turbinas, paletas, impulsores de alta cortante e impulsores recíprocos; de las cuales, las dos últimas no se tratan a continuación debido a la poca información de rendimiento y escasos datos de potencia que existen (Uhl y Gray, 1966a).

**Propelas.** Básicamente, son impulsores de alta velocidad y flujo axial, con una capacidad de circulación alta que permite el arrastre del líquido circundante. El diseño mayormente empleado corresponde a la propela de tres hojas modificada a partir de la propela tipo marina, Figura 17. La cara de la hoja que transmite el movimiento es plana o cóncava, mientras que la cara posterior es convexa. El área total de las hojas es frecuentemente dada como el cociente del área proyectada entre el área del disco, y abarca valores típicos entre 0,45 y 0,55. La inclinación propia de cada hoja varía continuamente desde la raíz hasta el extremo. Las propelas, por ser impulsores de flujo axial, son sensibles a casi cualquier cambio de viscosidad. Al incrementarse la viscosidad se incrementa el consumo de potencia y se reduce la

capacidad de descarga, por lo que las propelas son usadas principalmente en aplicaciones de baja viscosidad. Se utilizan con regularidad en el mezclado de fluidos miscibles y por otra parte en suspensiones de sólidos, ya que los patrones de flujo axial ocasionan el arrastre de los sólidos desde el fondo del recipiente, impidiendo que queden depositados (Brodkey y Hershey, 1988; Treybal, 1998; Uhl y Gray, 1966a).



Figura 17. **Diseño de una propela.** Tomada de MixMor, Incorporated, 2005, disponible: [www.agitadores.com](http://www.agitadores.com).

**Turbinas.** El término *turbina* ha sido aplicado a una amplia variedad de impulsores sin tomar en consideración el diseño, dirección de descarga o el carácter del flujo. El Instituto Americano de Ingenieros Químicos (AIChE), en su publicación “Standard Test Procedure for Impeller-Type Mixing Equipment” (citado en Uhl y Gray, 1966a), define una turbina como «un impulsor con ángulo de hoja esencialmente constante respecto a un plano vertical, sobre su entera longitud o sobre secciones finitas, teniendo hojas o verticales o fijas en un ángulo menor a  $90^\circ$  con la vertical»<sup>1</sup> (p.114).

La cantidad más común de hojas en un impulsor es cuatro o seis, las cuales pueden ser planas o curvadas. Existen dos formas básicas de turbina: tipo descarga radial de hojas planas y tipo empuje axial de hojas inclinadas; todas las demás son

---

<sup>1</sup> Original en inglés: «an impeller with essentially constant blade angle with respect to a vertical plane, over its entire length or over finite sections, having blades either vertical or set at angle less than  $90^\circ$  with the vertical »

modificaciones de éstas. La Figura 18 ilustra los diseños básicos de turbinas y sus modificaciones más populares (Uhl y Gray, 1966a).

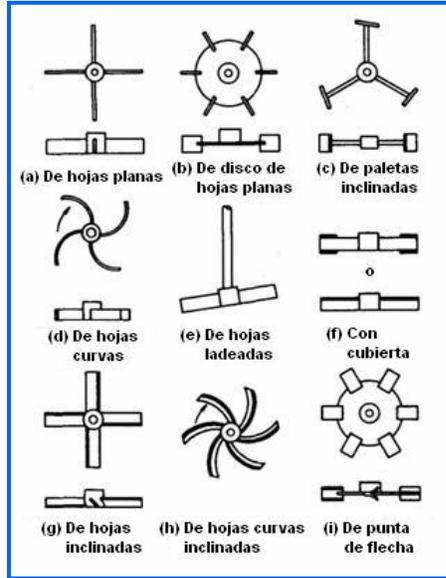


Figura 18. **Diseños básicos de turbinas.** Tomada de *Mixing: theory and practice*, Volume I (p.114) por Uhl y Gray, 1966a, Estados Unidos: Academic Press. Modificaciones de los autores.

Contrario a las propelas y demás impulsores de flujo axial, el consumo de potencia de las turbinas de descarga radial es independiente de la viscosidad para números de Reynolds bajos. Las turbinas son usadas para un extenso rango de viscosidad de fluidos y para una amplia variedad de aplicaciones, desde dispersiones multifásicas hasta mezclado de líquidos de altas viscosidades (Uhl y Gray, 1966a).

*Turbina de hojas planas.* También llamada *turbina de hojas rectas*, esta turbina de hojas verticales produce patrones de flujo radial, succionando los fluidos desde encima y debajo del impulsor. El ancho de las hojas generalmente es de un quinto a un octavo del diámetro de la turbina. Las turbinas de hojas planas (Figura 18(a) y Figura 19) se usan ampliamente en dispersiones gas-líquido (Uhl y Gray, 1966a).

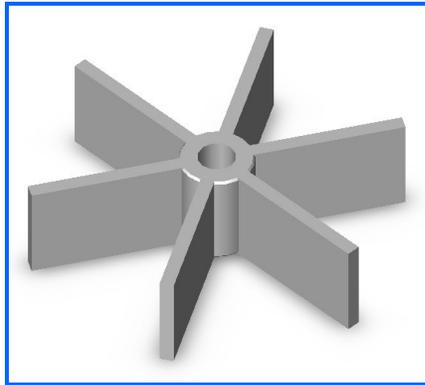


Figura 19. **Turbina de hojas planas.** Tomada de Post Mixing Optimization and Solutions, 2005, disponible: [www.postmixing.com](http://www.postmixing.com).

*Turbina de disco de hojas planas.* A lo largo de los años ha sido el impulsor más corrientemente usado en el ámbito industrial y de investigación para propósitos de mezclado general. También se le conoce como *turbina Rushton*, en honor a J. H. Rushton, su inventor y uno de los pioneros en el campo de la agitación. Este impulsor descarga un gran volumen de flujo en la dirección radial (Brodkey y Hershey, 1988). Su patrón de flujo es más uniforme que el del diseño de hojas planas sin disco; en la turbina Rushton, el disco actúa impidiendo el ascenso del gas a través del eje, y permite fijar un mayor número de hojas (Paul y otros, 2004). El diseño con seis hojas es el más común (Figura 18(b) y Figura 20(a)). Las investigaciones sobre los patrones de flujo de este impulsor han permitido observar, en las vecindades del impulsor, chorros a altas velocidades y sistemas complejos de vórtices, Figura 20(b). Estos últimos se forman inmediatamente después de que la hoja del impulsor pasa a través del fluido, y se desprenden desde la parte trasera de cada hoja como resultado de la alta velocidad de flujo sobre y alrededor de la misma. Debido a tales vórtices, el impulsor Rushton es frecuentemente seleccionado para dispersión de gases (Brodkey y Hershey, 1988).

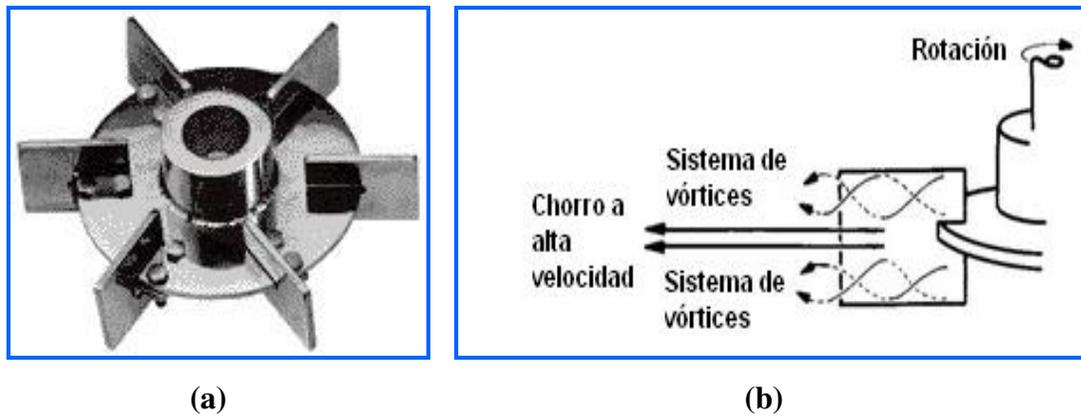


Figura 20. **Turbina de disco de hojas planas: (a) Modelo comercial y (b) Vórtices sobre la hoja del impulsor.** Figura 20(a) tomada de MixMor, Incorporated, 2005, disponible: [www.agitadores.com](http://www.agitadores.com). Figura 20(b) tomada de Transport phenomena: a unified approach (p.369) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company. Modificaciones de los autores.

*Turbina de paletas inclinadas.* Es simplemente una adaptación de la turbina de disco, con el área reducida por la inclinación de las paletas respecto al plano vertical (Figura 18(c)). Muy pocos datos de potencia o rendimiento se han publicado referentes a este impulsor (Uhl y Gray, 1966a).

*Turbina de hojas curvas.* Es una modificación de la turbina de hojas planas, con las hojas curvadas en sentido opuesto al de rotación (Figura 18(d)). Su forma está ideada para reducir el efecto mecánico cortante en la periferia del impulsor. Se emplea ampliamente en la industria para suspensiones de cristales frágiles, pulpas, fibras, etc. (Uhl y Gray, 1966a).

*Turbina de hojas ladeadas.* Un estudio afirma que en comparación con la turbina de hojas curvas tiene mejor rendimiento sin incremento de la potencia; sin embargo, no se han presentado datos cuantitativos que soporten tal afirmación (Uhl y Gray, 1966a) (ver Figura 18(e)).

*Turbina con cubierta.* Al colocar una placa, total o parcial, en el plano superior o inferior de una turbina de flujo radial, se controla el patrón de succión y descarga del impulsor. En la Figura 18(f), la turbina superior tiene anillos anulares en su tope y

fondo, y la turbina inferior tiene su tope completamente cubierto para restringir la succión únicamente a la parte inferior de la turbina (Uhl y Gray, 1966a).

*Turbina de hojas inclinadas.* La Figura 18(g) y Figura 21(a) muestran una turbina de este tipo. Tiene sus hojas inclinadas en un ángulo constante a lo largo de la longitud de la hoja, entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$  con respecto a un plano horizontal, siendo  $45^\circ$  el estándar comercial. Su buen balance de caudal y capacidades cortantes, hace que sea empleada para mezclado de líquidos y en propósitos generales (Uhl y Gray, 1966a; Paul y otros, 2004). Al igual que las propelas, este impulsor causa patrones de flujo axial, por lo que se usa frecuentemente en suspensiones de sólidos. Aunque el flujo es primariamente axial, la turbina de hojas inclinadas también genera una componente de flujo radial, que puede predominar si el ángulo de inclinación de las hojas tiende a  $90^\circ$ . Los vórtices generados por la turbina de hojas inclinadas son similares a los ocurridos sobre las alas de un avión, Figura 21(b) (Brodkey y Hershey, 1988; Uhl y Gray, 1966a).

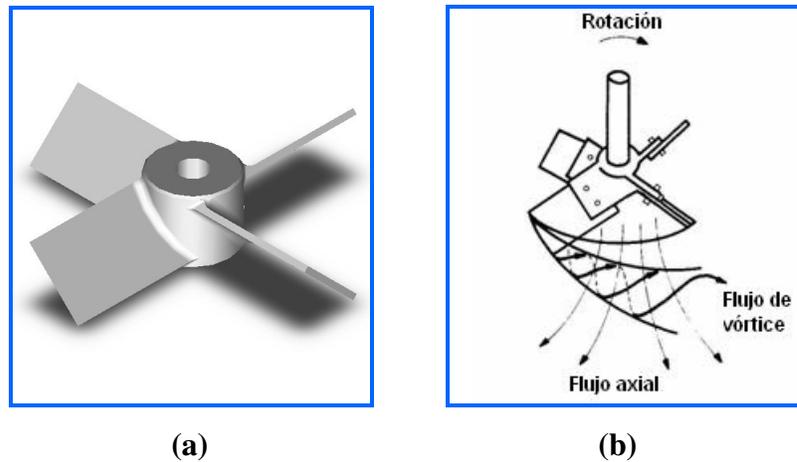


Figura 21. **Turbina de hojas inclinadas: (a) Modelo comercial y (b) Vórtices generados.** Figura 21(a) tomada de Post Mixing Optimization and Solutions, 2005, disponible: [www.postmixing.com](http://www.postmixing.com). Figura 21(b) tomada de Transport phenomena: a unified approach (p. 369) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company. Modificaciones de los autores.

*Turbina de hojas curvas inclinadas.* Resulta de combinar los diseños de la turbina de hojas curvas y la de hojas inclinadas, (Figura 18(h)). No se dispone de datos de

rendimiento o potencia de este impulsor, además de que su alto costo de fabricación hace que pueda ser considerado sólo en aplicaciones muy especiales (Uhl y Gray, 1966a).

*Turbina de punta de flecha.* Genera flujo mixto (axial y radial). Fue estudiada por algunos investigadores, aunque aparentemente no alcanzó importancia comercial (Uhl y Gray, 1966a) (ver Figura 18(i)).

**Paletas.** En su descripción más básica, este tipo de impulsores consta usualmente de dos hojas, horizontales o verticales, con una alta relación  $D/T$ ; sin embargo, formas mucho más complejas que ocupan gran espacio dentro del recipiente son empleadas con regularidad (Figura 22). La forma más simple es una viga plana horizontal, conocida como paleta *básica* (Figura 22(a)). Si este impulsor se amolda a la forma del fondo de un tanque se obtiene la paleta *ancla* o *herradura* (Figura 16(b) y Figura 22(d)), la cual básicamente genera un patrón de flujo tangencial, y remueve el fluido próximo a las paredes del recipiente para que fluido a diferente temperatura reemplace al anterior, y así se favorezca la transferencia de calor. La paleta *lámina* (Figura 22(e)) es una con una relación  $W/D$  extrema. Una paleta con múltiples brazos conectados por barras verticales se denomina paleta *verja* (Figura 22(f)). Otro impulsor de este tipo es el *de doble movimiento* (Figura 22(h)); consta de dos ensamblajes girando en sentido contrario, y debido a que requiere de un mecanismo especial de ejes concéntricos moviéndose en direcciones opuestas, su uso se restringe a unos pocos procesos para fluidos muy viscosos o muy no-newtonianos. La paleta *hélice* (Figura 22(i)) es un importante miembro de este grupo de impulsores; consiste de una cinta que sigue una trayectoria helicoidal unida a un eje central; este impulsor bombea en forma descendente, es eficiente para la transferencia de calor debido a su proximidad con las paredes del recipiente, y es ideal para mezclado de materiales altamente viscosos (Uhl y Gray, 1966a).

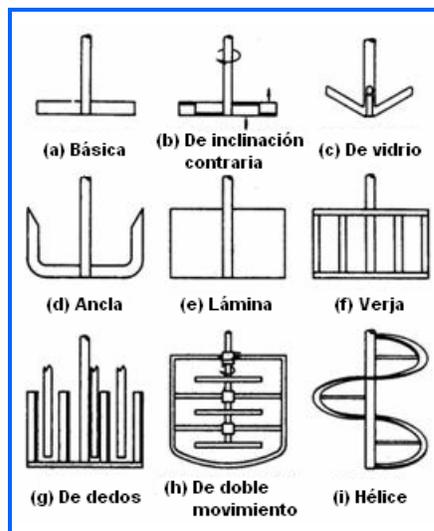


Figura 22. **Diseños de paletas.** Tomada de *Mixing: theory and practice*, Volume I (p.116) por Uhl y Gray, 1966a, Estados Unidos: Academic Press. Modificaciones de los autores.

Las paletas se emplean en líquidos de muy alta viscosidad, como lo son muchas soluciones no-Newtonianas. A tales viscosidades, la agitación es realizada en condiciones de flujo laminar, y debido a que este régimen de flujo no transporta momento tan bien como el flujo turbulento, estas formas inusuales de impulsores son las más efectivas para actuar sobre la mayor cantidad de fluido posible. Estos impulsores trabajan a bajas velocidades de giro debido a sus grandes proporciones y a restricciones mecánicas; su uso no deja espacio para mamparas, a la vez que éstas no son necesarias. Las paletas tienen gran aplicación en la industria de pastas, cosméticos, adhesivos, y pinturas (Brodkey y Hershey, 1988; Uhl y Gray, 1966a).

**Selección del impulsor.** Es posible usar cualquier tipo de impulsor, bien sea propela, turbina, o paleta para satisfacer una amplia variedad de procesos. Pero una incorrecta selección del impulsor resultará en un mayor requerimiento de potencia, más elevado costo, o un menor rendimiento del proceso (Uhl y Gray, 1966a).

La viscosidad del fluido es uno de los tantos factores que afectan la selección del tipo de impulsor. A grandes rasgos, las propelas se emplean para viscosidades de fluido por debajo de los 3.000 cP; las turbinas se usan por debajo de 100.000 cP; las paletas modificadas tales como el tipo ancla pueden ser usadas entre 50.000 y

500.000 cP; para viscosidades más altas, hasta 1.000.000 cP, se emplean por lo general paletas hélice, sin embargo, éstas han sido utilizadas en fluidos de hasta 25.000.000 cP (Geankoplis, 2003).

Una selección preliminar del impulsor es realizada basándose en la viscosidad y el volumen de fluido. La Figura 23 correlaciona estas variables de una manera general; no obstante, se debe aclarar que esta representación es relativa ya que los límites para cada rango pueden ser cambiados por otras variables (Uhl y Gray, 1966a).

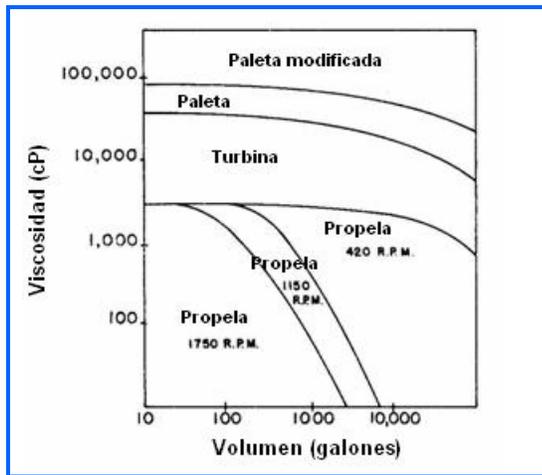


Figura 23. **Diagrama para la selección del impulsor.** Tomada de *Mixing: theory and practice*, Volume I (p.161) por Uhl y Gray, 1966a, Estados Unidos: Academic Press. Modificaciones de los autores.

#### 2.3.7.4. Motor

Existen muchos motores de velocidad variable, pero no todos tienen las características necesarias para su uso en el ámbito experimental. Los requerimientos esenciales son: (a) amplio rango de velocidad; (b) característica de potencia de torque constante; (c) buena regulación de velocidad bajo variación de carga; y (d) diseño compacto, a prueba de explosiones y de fácil montaje. Estas especificaciones son para motores al servicio de múltiples propósitos a escala de laboratorio, y naturalmente, no todas son obligatorias para una aplicación a escala industrial en específico (Uhl y Gray, 1966a).

El rango de velocidad debe ser extenso, no para permitir variar el suministro de potencia, ya que con  $P \propto N^3$  una pequeña variación de velocidad tiene un gran efecto, sino más bien para permitir el funcionamiento de impulsores de diferentes tamaños y tipos. Para un proceso específico puede ser apropiado utilizar un diseño de motor de torque variable de bajo costo, pero para estudios experimentales, tanto el problema específico como los impulsores de prueba pueden imponer cualquier carga a cualquier velocidad del rango, por lo que un motor con torque constante es el adecuado. Por otra parte, para asegurar la validez y consistencia de los datos es importante que la velocidad del agitador no fluctúe con cambios en las propiedades del fluido; por tanto, se hace necesario que el motor cuente con una buena regulación de la velocidad (Uhl y Gray, 1966a).

El motor empleado en un proceso de agitación específico a escala de planta es seleccionado de acuerdo a la potencia que demande dicho proceso (Brodkey y Hershey, 1988).

#### ***2.3.8. Semejanza Geométrica: Herramienta para el Escalado***

La aplicación de la ecuación general del balance de propiedades (forma generalizada de expresar las leyes de conservación de la masa, energía y momento) o alguna ecuación similar para resolver un problema de agitación es sumamente compleja. En primer lugar, porque el flujo es tridimensional, y por lo general las condiciones iniciales y de borde son desconocidas, y en segundo lugar, porque frecuentemente debe considerarse simultáneamente transferencia de calor, masa y momento. La dificultad de una solución cuantitativa a la ecuación general del balance de propiedades ha ocasionado que se busquen aproximaciones empíricas mediante análisis dimensional, las cuales han probado ser muy acertadas (Brodkey y Hershey, 1988).

La mejor aproximación para el diseño de un equipo de agitación a escala de planta vendría de obtener datos de un experimento apropiado en un aparato a escala de planta. Desafortunadamente, para nuevos procesos esta aproximación no es

generalmente posible, y los datos deben ser obtenidos de equipos a escala de laboratorio. Lógicamente, mientras más cercano sea el tamaño del recipiente de laboratorio al del proceso, más satisfactorio será el escalado, pero muchas veces esto no es viable y el diseño se debe generar sólo con datos provenientes de un equipo pequeño de laboratorio (Brodkey y Hershey, 1988).

El escalado, en agitación, sigue los principios del modelado de fenómenos, por lo que se procura mantener semejanza geométrica entre los sistemas de agitación involucrados. La Figura 24 considera dos agitadores, uno a escala de laboratorio y el otro a escala de planta, para que se cumpla la semejanza geométrica entre los agitadores las siguientes relaciones se deben satisfacer (Brodkey y Hershey, 1988):

$$\begin{aligned}
 D_1/T_1 &= D_2/T_2 \\
 C_1/T_1 &= C_2/T_2 \\
 Z_1/T_1 &= Z_2/T_2 \\
 B_1/T_1 &= B_2/T_2 \\
 W_1/D_1 &= W_2/D_2
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

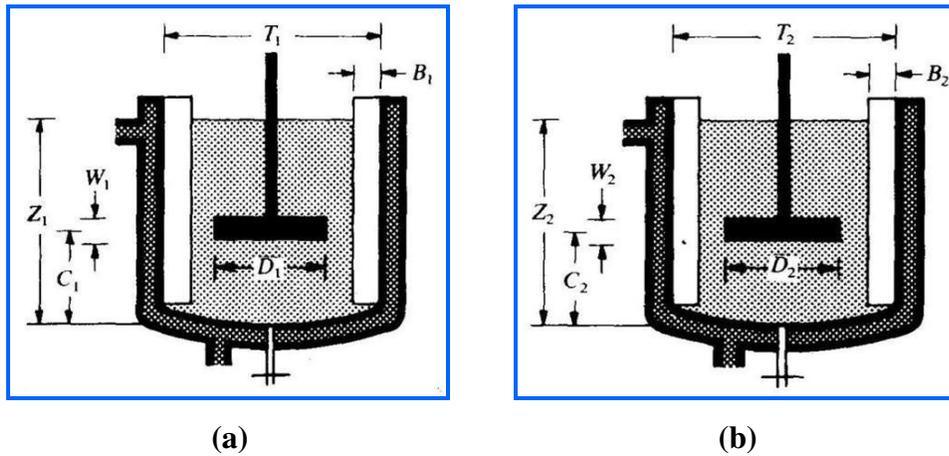


Figura 24. Principales dimensiones en la semejanza geométrica de recipientes de agitación mecánica: (a) Recipiente de laboratorio y (b) Recipiente de planta. Tomadas de Transport phenomena: a unified approach (p.371) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company. Modificaciones de los autores.

En *Transport phenomena: a unified approach* (Brodkey y Hershey, 1988) se discute acerca de los valores que toman las relaciones definidas en la ecuación (1). A continuación se presentan los rangos sugeridos.

La relación  $D/T$  normalmente se fija a  $1/3$  para regímenes de flujo turbulento. Esta relación se varía en los siguientes rangos:

$$0,2 \leq D/T \leq 0,5 \quad \text{Para flujo turbulento} \quad (2)$$

$$0,7 \leq D/T \leq 1,0 \quad \text{Para flujo laminar} \quad (3)$$

El rango habitual para la relación  $C/T$  corresponde a:

$$0,1 \leq C/T \leq 0,4 \quad (4)$$

El valor más común para esta relación es  $1/3$ . En caso de desear un bajo nivel de mezclado o suspensiones de sólidos lejos del fondo del recipiente, se puede aproximar  $C/T$  al límite inferior del rango.

La relación  $Z/T$  tiene un valor habitual de 1. Sin embargo,  $Z/T$  puede tomar valores dentro del rango:

$$0,5 \leq Z/T \leq 1,0 \quad (5)$$

La relación  $Z/T$  tiene poca influencia en el consumo de potencia. Cambios en esta relación pueden alterar los patrones de flujo dentro del recipiente, y si  $Z/T$  excede el valor de 1, pueden existir zonas muertas dentro del recipiente, que pueden eliminarse agregando más impulsores.

El diseño de las mamparas se basa en maximizar la entrada de potencia al fluido. Con cuatro mamparas separadas equidistantemente a lo largo de la pared del recipiente, la relación  $B/T$  normal es:

$$B/T = 1/12 \quad (6)$$

En lo que respecta a la relación  $W/D$ , su rango o valor depende del diseño propio del impulsor. Al igual que  $W$ , el número, inclinación, longitud y espesor de las hojas, y demás características propias de cada diseño de impulsor deben ser tomadas en cuenta, ya que el escalado debe realizarse con impulsores geoméricamente semejantes (Brodkey y Hershey, 1988).

### 2.3.9. Potencia en Agitación

Al principio, la imposibilidad de aplicar un tratamiento matemático directo para correlacionar la potencia del agitador condujo al empleo de una aproximación empírica. Debido a que la potencia tiene mucho en común con los métodos de análisis aplicados a la dinámica de fluidos, el análisis dimensional y el modelado han permitido el desarrollo de un método de estudio de la potencia (Uhl y Gray, 1966a).

Los primeros investigadores consideraron que la potencia del impulsor debía ser una función de: la geometría del impulsor y del recipiente, las propiedades del fluido (viscosidad y densidad), la velocidad de angular del impulsor y la fuerza de gravedad. El teorema de Buckingham da como resultado la siguiente ecuación general adimensional para la relación de las variables (Uhl y Gray, 1966a):

$$f\left(\frac{D^2 N \rho}{\mu}, \frac{DN^2}{g}, \frac{P}{\rho N^3 D^5}, \frac{D}{T}, \frac{D}{Z}, \frac{D}{C}, \frac{D}{p}, \frac{D}{W}, \frac{D}{l}, \frac{n_2}{n_1}\right) = 0 \quad (7)$$

La igualdad de todos los grupos en la ecuación (7) asegura la semejanza entre sistemas de diferente tamaño. Los últimos siete términos en esta ecuación representan la condición de semejanza geométrica; la dimensión de referencia es el diámetro del impulsor. El último término no es una relación dimensional lineal, pero es requerido para dar razón del cambio del número de hojas del impulsor (Uhl y Gray, 1966a).

La ecuación (7) asume un solo impulsor centrado con el eje de un recipiente cilíndrico vertical de fondo plano (Uhl y Gray, 1966a).

Establecida la semejanza geométrica, las semejanzas cinemática y dinámica se presentan juntas, ya que en un sistema de fluidos ellas están interrelacionadas.

Limitando el desarrollo a sistemas geoméricamente semejantes, la ecuación (7) se reduce a (Uhl y Gray, 1966a):

$$f\left(\frac{D^2 N \rho}{\mu}, \frac{DN^2}{g}, \frac{P}{\rho N^3 D^5}\right) = 0 \quad (8)$$

La igualdad de los grupos en esta expresión asegura la semejanza cinemática y dinámica. Esta relación fue derivada por análisis dimensional, pero los mismos grupos adimensionales también se pueden obtener de la ecuación de movimiento de Navier-Stokes (Uhl y Gray, 1966a).

Cada uno de estos grupos tiene un significado físico que será presentado a continuación. No obstante, conviene antes definir una variable; se trata de la velocidad en el extremo del impulsor, de símbolo  $U_t$ , y corresponde a la velocidad angular por el radio del impulsor. Cuando  $N$  está en unidades de  $s^{-1}$ , la velocidad angular es  $2\pi N$ , y al multiplicarla por el radio del impulsor se llega a (Brodkey y Hershey, 1988):

$$U_t = \pi ND \quad (9)$$

Nótese que a partir de la ecuación (9), y para las ecuaciones subsecuentes, la velocidad de angular  $N$  está expresada en unidades de  $s^{-1}$  y no en radianes por unidad de tiempo (Brodkey y Hershey, 1988).

### 2.3.9.1. *Números Adimensionales*

Los grupos o números adimensionales son cocientes de cantidades semejantes (longitudes, fuerzas, velocidades, etc.) que permiten una caracterización generalizada de la interacción de las variables físicas en un sistema (Uhl y Gray, 1966a).

***Número de Reynolds.*** Reynolds encontró a partir de sus experimentos en la transición de flujo laminar-turbulento, que un grupo adimensional, ahora llamado número de Reynolds,  $N_{Re}$ , podía ser usado para predecir empíricamente el punto de

transición. Este número relaciona las fuerzas inerciales con las viscosas (Brodkey y Hershey, 1988):

$$N_{Re} = \frac{LU\rho}{\mu} \quad (10)$$

El número de Reynolds, así como los demás grupos adimensionales empleados en agitación, tienen como longitud característica el diámetro del impulsor  $D$ , y como velocidad característica la velocidad en el extremo del impulsor  $U_t$ . Por consiguiente, el número de Reynolds para agitación, algunas veces llamado *número de Reynolds del impulsor*, es (Brodkey y Hershey, 1988):

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \quad (11)$$

**Número de Froude.** Relaciona las fuerzas inerciales con las gravitatorias. En agitación, el número de Froude se define de la siguiente forma (Uhl y Gray, 1966a):

$$N_{Fr} = \frac{DN^2}{g} \quad (12)$$

La mayoría de los procesos de agitación se llevan a cabo en líquidos con superficie libre; el campo gravitatorio afecta la forma de la superficie y por ende el patrón de flujo. Este efecto es particularmente notable en recipientes donde ocurre el vórtice central; la forma del vórtice representa un balance entre las fuerzas gravitatorias e inerciales (Uhl y Gray, 1966a).

Para recipientes con mamparas (en donde no se forma el vórtice central) y para agitación en régimen laminar los efectos gravitatorios son despreciables, pero para recipientes sin mamparas donde ocurra turbulencia, el número de Froude puede ser un factor importante (Brodkey y Hershey, 1988; Uhl y Gray, 1966a).

**Número de potencia.** El número de potencia se define como (Uhl y Gray, 1966a):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (13)$$

Para dar una idea del significado físico del número de potencia en agitación, es conveniente considerarlo de forma análoga al factor de fricción en la caída de presión en tuberías, y al coeficiente de arrastre en cuerpos sólidos inmersos en una corriente de fluido (Uhl y Gray, 1966a).

### 2.3.9.2. Correlación de los Números Adimensionales y Curvas de Correlación

En *Mixing: theory and practice* (Uhl y Gray, 1966a) se desarrolla la ecuación (7) de la siguiente forma:

$$N_p = K(N_{Re})^a (N_{Fr})^b \left(\frac{T}{D}\right)^c \left(\frac{Z}{D}\right)^d \left(\frac{C}{D}\right)^e \left(\frac{p}{D}\right)^f \left(\frac{W}{D}\right)^g \left(\frac{l}{D}\right)^h \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^i \quad (14)$$

Por semejanza geométrica, esta ecuación se reduce a:

$$N_p = K_1 (N_{Re})^a (N_{Fr})^b \quad (15)$$

En el área de flujo de fluidos, para presentar los datos gráficamente por lo general se emplea un gráfico logarítmico con el número de Reynolds como abscisa. En tal sentido, la ecuación (15) se puede reordenar como:

$$\phi = \frac{N_p}{(N_{Fr})^b} = K_1 (N_{Re})^a \quad (16)$$

Para recipientes con mamparas, el exponente b del número de Froude usualmente es igual a 0, por lo que  $\phi = N_p$ , resultando curvas de  $N_p$  vs.  $N_{Re}$  independientes del número de Froude.

Las curvas típicas de  $\phi$  vs.  $N_{Re}$  para configuraciones frecuentes en la práctica se ilustran en la Figura 25. En estas curvas se aprecian tres regímenes.

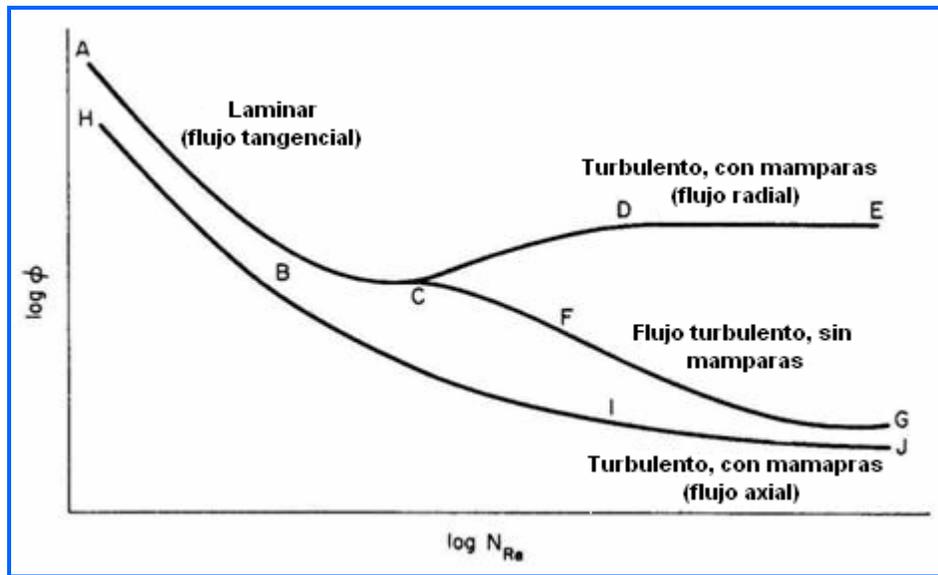


Figura 25. **Curvas de potencia características de los impulsores.** Tomada de *Mixing: theory and practice*, Volume I (p.125) por Uhl y Gray, 1966a, Estados Unidos: Academic Press. Modificaciones de los autores.

**Régimen turbulento.** Las curvas DE e IJ muestran que para números de Reynolds elevados, en recipientes con mamapas, el número de potencia es constante e independiente del número de Reynolds:

$$N_p = K' \tag{17}$$

Los coeficientes de arrastre de cuerpos inmersos en corrientes de líquidos también llegan a ser constantes a altos números de Reynolds, lo que evidencia la analogía mencionada anteriormente referente al número de potencia.

Sustituyendo la ecuación (17) en la ecuación (13), y despejando la potencia:

$$P = K' \rho N^3 D^5 \tag{18}$$

Así, en presencia de semejanza geométrica, para el rango turbulento la potencia puede ser considerada proporcional a la densidad, velocidad del impulsor al cubo, diámetro del impulsor a la quinta potencia, e independiente de la viscosidad.

**Régimen laminar.** Las líneas AB y HB representan el rango viscoso del flujo. La pendiente de  $-1$  de estas líneas es típica para todos los tipos de impulsores, y ya que los efectos del número de Froude son despreciables en este rango:

$$N_p = K''(N_{Re})^{-1} \quad (19)$$

Se tiene que el número de potencia es inversamente proporcional al número de Reynolds, tal como sucede con el coeficiente de arrastre para una esfera en un medio viscoso, lo que de nuevo demuestra la analogía entre ambos factores.

Sustituyendo la ecuación (19) en la ecuación (13), y despejando la potencia:

$$P = K'' \mu N^2 D^3 \quad (20)$$

Se observa que la potencia es independiente de la densidad, reflejando el predominio de las fuerzas viscosas sobre las de inercia para el régimen de flujo laminar.

**Régimen transitorio.** En agitación, al igual como sucede en el flujo dentro de una tubería, existe una región donde se da la transición gradual de un flujo laminar a uno turbulento completamente desarrollado: en un equipo de agitación dado, al incrementar lentamente  $N$  desde cero, un régimen de flujo laminar aparece; este régimen se mantiene para valores bajos de número de Reynolds; pero para valores intermedios, el flujo cerca del impulsor comienza a ser turbulento (empiezan a formarse en las vecindades del impulsor sistemas de vórtices) mientras permanece laminar en las zonas alejadas a éste; a medida que el número de Reynolds se incrementa aún más, el tamaño de la zona turbulenta crecerá hasta abarcar todo el recipiente. La región donde culmina el flujo laminar y comienza el flujo completamente turbulento sigue siendo motivo de investigación.

La Figura 25 permite notar que la curva para el rango de transición es de diferente forma y extensión para los diversos diseños de impulsores. La literatura extiende la región de transición desde  $N_{Re} = 10$  (punto B) hasta  $N_{Re} = 10^4$  (puntos D e I), pero

estos valores deben ser considerados sólo como límites aproximados (Brodkey y Hershey, 1988; Uhl y Gray, 1966a).

Se puede observar en la Figura 25 que la curva para recipientes con mamparas comienza a ser diferente a la de recipientes sin mamparas luego de haber finalizado el rango laminar (aproximadamente en  $N_{Re} = 300$ ), lo que concuerda con el hecho de que el vórtice central comienza a formarse con la turbulencia (Uhl y Gray, 1966a; Geankoplis, 2003). Además, se aprecia que para impulsores de flujo radial, los recipientes con mamparas permiten alcanzar un número de potencia constante a un número de Reynolds más bajo (Uhl y Gray, 1966a).

Debido al extenso uso que se le ha dado al gráfico de  $N_p$  vs.  $N_{Re}$  para correlacionar la potencia del impulsor, es conveniente e importante recordar que sería un error no tener en cuenta la semejanza geométrica, y considerar que igual número de Reynolds es lo único necesario para precisar la semejanza de sistemas de agitación (Uhl y Gray, 1966a).

### 2.3.9.3. Correlaciones para Turbinas

Desde alrededor de 1940, las turbinas han sido la herramienta de la mayoría de investigadores para el estudio de casi todas las aplicaciones de agitación (Uhl y Gray, 1966a). La Figura 26 es una correlación obtenida experimentalmente para agitación en una sola fase de fluidos newtonianos, con el eje del impulsor en posición vertical y concéntrico al recipiente. Se trata de una correlación para varios tipos de turbinas, la cual posee diferentes formas de curvas características según el tipo de turbina. Todos los impulsores han alcanzado un valor constante de  $N_p$  para  $N_{Re} = 10^4$ , y sus curvas tienen una pendiente nominal de  $-1$  en el rango laminar. En las curvas de la turbina de hojas planas, curvas 2 y 4, el rango de transición se extiende desde  $N_{Re} = 15$  hasta sólo 1.500. El rango de transición para las turbinas de disco y de hojas curvas, curvas 1, 3 y 5, se extiende hasta alrededor de  $N_{Re} = 10^4$ . La curva 6, para la turbina de hojas inclinadas, tiene una forma parecida a la de las propelas, lo que es de esperar debido a

que se trata de impulsores de flujo axial. Es de notar la diferencia en requerimientos de potencia existente en el rango turbulento entre la turbina de disco y la de hojas planas: aunque la turbina de hojas planas de la curva 2 tiene las hojas más largas que la de disco (curva 1), consume aproximadamente 25% menos potencia; con la reducción de  $W/D$ , curvas 3 y 4, la diferencia es aproximadamente 15%. Por su parte, la turbina de hojas inclinadas consume considerablemente menos potencia que las demás (Uhl y Gray, 1966a; Treybal, 1998).

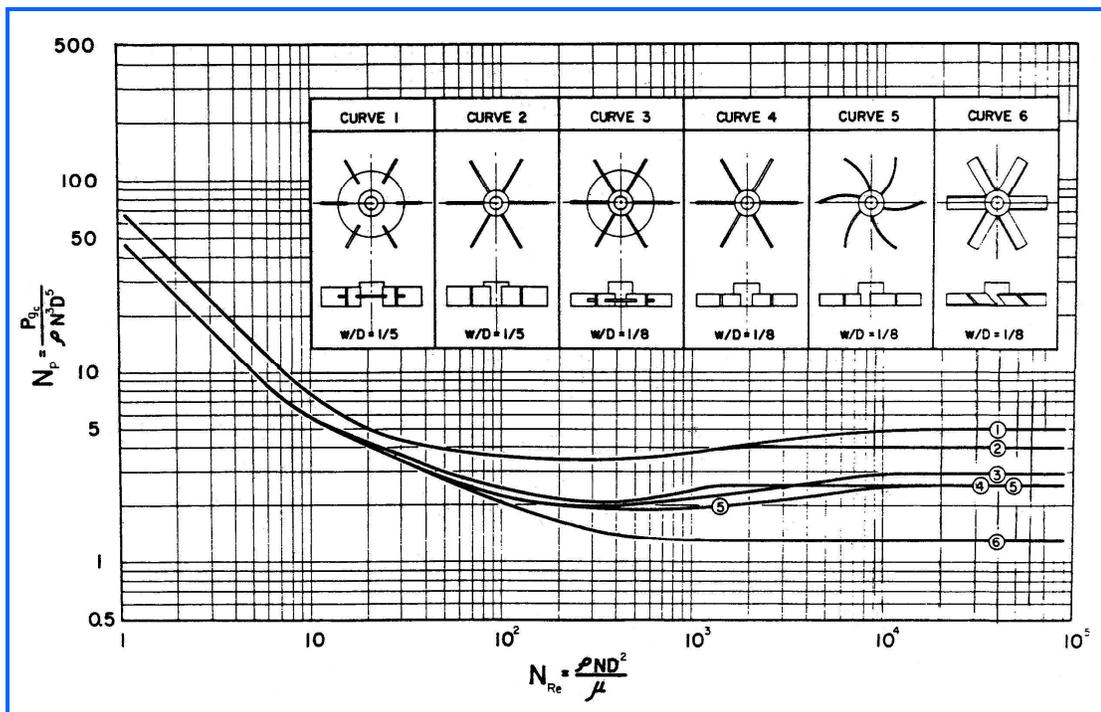


Figura 26. Curvas de  $N_p$  vs.  $N_{Re}$  para diferentes turbinas. Tomada de Transport phenomena: a unified approach (p.376) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company.

Correlaciones gráficas como las mostradas en la Figura 26 son útiles para predecir la potencia al aplicar el escalamiento, o en sistemas con fluidos tóxicos, corrosivos o explosivos, donde un estudio directo sería difícil y riesgoso. Por otra parte, también permiten obtener aproximaciones cuando las condiciones de trabajo son diferentes (Treybal, 1998; Uhl y Gray, 1966a).

### 2.3.10. Agitación en Sistemas Gas-Líquido

La agitación mecánica de sistemas gas-líquido es ampliamente usada en procesos industriales que involucran absorción, oxidación, hidrogenación, fermentación, entre otros. También es empleada para llevar a cabo procesos bioquímicos, tales como fermentación aeróbica, manufactura de proteínas, y tratamiento de aguas residuales (Paul y otros, 2004).

#### 2.3.10.1. Formación de Burbujas

Una extensa recopilación sobre este tema se encuentra en *Manual del ingeniero químico* (Perry y Green, 2001). En éste, se considera que la formación de burbujas en un líquido se debe a alguna de las tres causas generales siguientes: (a) pueden formarse por desupsaturación de una solución de gas o por descomposición de un componente del líquido; (b) pueden introducirse en el líquido mediante un burbujeador, distribuidor, o por arrastre mecánico; (c) pueden ser el resultado de la desintegración de burbujas mayores ya presentes en el líquido.

**Formación en un orificio único y en múltiples orificios.** La formación de burbujas en un orificio o en un capilar sumergido en un líquido ha sido objeto de numerosos estudios. Hay tres regímenes de producción de burbujas: (a) de burbuja única; (b) intermedio y (c) de chorro.

En el *régimen de burbuja única* las burbujas se producen una a una, su diámetro está determinado básicamente por el diámetro del orificio, la tensión interfacial de la película gas-líquido, las densidades del líquido y del gas, y la aceleración de la gravedad, de acuerdo con la siguiente relación:

$$\frac{d_b}{d_o} = \left( \frac{6\sigma}{d_o^2(\rho_L - \rho_G)} \right)^{1/3} \quad (21)$$

El tamaño de burbuja es independiente del caudal de gas, pero la frecuencia de formación es directamente proporcional a dicho caudal. Esta ecuación no incluye los efectos de inercia o viscosos. Si el diámetro de orificio es demasiado grande, el de la burbuja será menor que aquél, como lo predice la ecuación (21), y no podrán formarse burbujas estacionarias de forma estable.

Se ha mostrado que si se mantiene la viscosidad del líquido por debajo de 100 cP, ésta tiene muy poco efecto sobre el volumen de burbuja, mientras que el tamaño de burbuja aumenta considerablemente sobre el predicho por la ecuación (21) para viscosidades de líquido superiores a 1.000 cP. De hecho, varios investigadores han encontrado que sus datos están de acuerdo con una ecuación teórica obtenida igualando la fuerza de flotación a la de arrastre, basada en la ley de Stokes, con la velocidad del ecuador de la burbuja al desprenderse:

$$d_b = \left( \frac{6}{\pi} \right) \left( \frac{4\pi}{3} \right)^{1/4} \left( 15 \times \frac{vQ}{2g} \right)^{3/4} \quad (22)$$

A medida que el caudal de gas a través del orificio sumergido aumenta por encima del límite del régimen de burbuja única, la frecuencia de formación de burbujas aumenta más lentamente, y las burbujas comienzan a crecer en tamaño. Este comportamiento corresponde al *régimen intermedio*, en cuya parte superior la frecuencia se hace casi constante con respecto al caudal de gas, y el tamaño de burbuja aumenta con esta última variable. Las variables que afectan principalmente al tamaño de burbuja en esta región son: diámetro del orificio, efectos de inercia en el líquido, viscosidad del líquido, densidad del líquido, y la relación entre la constancia del caudal de gas y la constancia de la presión en el orificio.

El *régimen de chorro* aparece cuando la velocidad aumenta suficientemente, se produce turbulencia en el orificio, y la corriente de gas adopta un chorro continuo que se rompe a cierta distancia por encima del orificio. Realmente, la corriente consta de grandes burbujas irregulares, estrechamente empaquetadas, con un rápido movimiento de torbellino.

Con referencia a la formación de burbujas en múltiples orificios, a velocidades elevadas tiene lugar la coalescencia entre burbujas formadas en los distintos orificios individuales.

En líneas generales, se puede decir que mientras mayor sea el diámetro del orificio, la tasa de flujo a través de éste, y la viscosidad del líquido, mayor será el diámetro de las burbujas; teniendo en cuenta que el rompimiento por turbulencia y la coalescencia también alterarán su tamaño, ambos determinados por el patrón y régimen de flujo presentes (Treybal, 1998).

**Arrastre y desintegración mecánica.** En un contacto bifásico, el gas puede ser arrastrado hacia el seno del líquido por el vórtice central de la masa de líquido agitada, formándose burbujas pequeñas que son capturadas en las trayectorias de los remolinos turbulentos. La desintegración de una masa de gas sumergida tiene lugar o bien por la ruptura turbulenta del exterior de la masa, de donde son arrancadas burbujas menores, o bien por la influencia de la tensión superficial, cuando la masa adopta forma cilíndrica o de disco debido a las fuerzas de inercia o de rozamiento (Perry y Green, 2001).

#### *2.3.10.2. Velocidad Terminal de las Burbujas*

Las burbujas pequeñas, de diámetro inferior a 0,7 mm, son, esencialmente esféricas y se comportan como esferas rígidas; su velocidad terminal está limitada por el arrastre viscoso y obedece la ley de Stokes. Para burbujas con diámetro entre 0,7 y 1,4 mm, la circulación de gas dentro de la burbuja ocasiona que los esfuerzos de corte en la interfase sean reducidos y la velocidad de ascenso sea mayor a la predicha por la ley de Stokes. Cuando el diámetro está entre 1,4 y 6 mm, las burbujas dejan de ser esféricas y al ascender siguen una trayectoria zigzagueante o espiral. Las burbujas de más de 6 mm de diámetro adoptan forma de casco con fondo plano. En general, una vez que las burbujas se han hecho suficientemente grandes como para que su

velocidad terminal se aparte de la predicha por la ley de Stokes, su comportamiento se vuelve complicado y errático (Mendelson, 1967; Perry y Green, 2001).

En síntesis, la velocidad de elevación en estado estacionario de burbujas aisladas de gas, es directamente proporcional al diámetro de las burbujas y a la diferencia de densidad entre el líquido y el gas; por su parte, la viscosidad del líquido tiene un efecto reductor en la velocidad de ascensión de las burbujas (Treybal, 1998). No obstante, en recipientes con agitación, la coalescencia y la ruptura pueden ser tan rápidas y violentas que la velocidad de ascenso de una burbuja individual carecería de sentido (Perry y Green, 2001).

#### *2.3.10.3. Burbujeador*

Un burbujeador es un dispositivo con el cual una corriente de gas, en forma de pequeñas burbujas, es introducida en un líquido. Si el diámetro del tanque es pequeño, el burbujeador, localizado en el fondo del tanque, puede ser un simple tubo abierto a través del cual el gas llegue hasta el líquido. El propósito del burbujeador puede ser poner en contacto el gas burbujeador con el líquido; también puede ser simplemente un aparato para agitar (Treybal, 1998).

La manera de introducir el gas dentro del líquido no ha sido una variable apreciable en los trabajos de investigación publicados. La práctica comercial es usar un anillo hueco, con orificios perforados en su parte superior, de diámetro igual o ligeramente menor al del impulsor, colocado debajo de éste (Uhl y Gray, 1966a; Paul y otros, 2004).

#### *2.3.10.4. Potencia en Presencia de Gas*

La predicción del consumo de potencia en sistemas gas-líquido no se ha resuelto satisfactoriamente (Uhl y Gray, 1966a). La presencia de gas en el contenido del recipiente ocasiona que disminuya la potencia requerida para mover el impulsor a una cierta velocidad (entre 10 y 50% menos que la potencia requerida en ausencia de gas)

(Geankoplis, 2003), probablemente debido al descenso en la densidad media de la mezcla. Cuando se va a seleccionar un motor para agitación en sistemas gas-líquido se debe tener esto presente, con el fin de que el motor no sufra una sobrecarga, en caso de que el flujo de gas sea suspendido por cualquier razón. En tal sentido, el motor y demás componentes mecánicos debieran seleccionarse para trabajar como si no hubiese gas presente (Treybal, 1998).

#### *2.3.10.5. Separación de Fases*

En muchos procesos industriales suele ser deseable o necesario separar las dispersiones gas-líquido. Aunque normalmente la separación se producirá de forma natural, es frecuente que su velocidad resulte económicamente inadmisibles, por lo que se utilizan operaciones de separación para acelerarla (Perry y Green, 2001).

Cuando las burbujas de gas producen una dispersión inestable, ésta se separa bajo la influencia de la gravedad, una vez que la mezcla se ha dejado de someter a la influencia de las fuerzas de dispersión. Las mayores dificultades en la separación se presentan cuando la velocidad de ascenso de las burbujas es muy baja, bien porque el gas está disperso en forma de burbujas de tan sólo unos micrómetros de tamaño, o bien porque el líquido presenta una elevada viscosidad. Esto indica la necesidad de largos tiempos de separación para gases finamente dispersados. En tales circunstancias la coalescencia de la fase dispersa puede ser de gran ayuda. Un ejemplo de este tipo de sistemas es la evolución de gas procedente de un líquido, en el que se disolvió inicialmente el gas o se liberó por reacción química (Perry y Green, 2001).

En el caso de separaciones difíciles, es necesario aumentar la velocidad de coalescencia, lo cual se puede lograr mediante la agitación del sistema. Sin embargo, debe evitarse la turbulencia del flujo, ya que podría generarse una retromezcla de los fluidos parcialmente separados (Perry y Green, 2001).

### 2.3.11. Diseño Mecánico de los Impulsores

Durante el diseño de cualquier elemento mecánico los principales factores a tener en cuenta son: (a) el análisis y la evaluación de las fuerzas que actúan sobre el sistema y (b) entender como estas fuerzas son transmitidas y amplificadas o amortiguadas (Uhl y Gray, 1966b).

La viscosidad y la resistencia inercial del líquido a ser agitado generan fuerzas de corte y flexión en el agitador; por lo cual para el diseño del mismo, hay que tener en cuenta la actuación de estas fuerzas (Uhl y Gray, 1966b).

#### 2.3.11.1. Diseño del Eje del Impulsor

La función principal del eje es transmitir el torque del motor al impulsor, durante su funcionamiento el eje experimenta flexión debido a las fuerzas hidráulicas que actúan sobre el impulsor (Ramsey y Zoller, 1976).

El máximo momento flector es la suma del producto de las fuerzas hidráulicas y la distancia del impulsor al primer apoyo del eje (Ramsey y Zoller, 1976):

$$M_{\max} = \sum (19.000 H_{pr} L' / ND) \quad (23)$$

donde  $H_{pr}$  es la potencia del impulsor [hp],  $L'$  la longitud del eje desde el punto de aplicación de la fuerza hidráulica al primer apoyo [in],  $N$  la velocidad angular del eje [rpm] y  $D$  el diámetro del impulsor [in].

La actuación simultánea de las cargas de torsión y flexión se resuelven en la generación de esfuerzos de corte y de tensión que actúan sobre el eje. El diámetro mínimo del eje será el valor más grande de las siguientes relaciones (Ramsey y Zoller, 1976).

$$d_s = \left[ \frac{16 \sqrt{(T_{Q(\max)})^2 + (M_{\max})^2}}{\pi \sigma_s} \right]^{1/3} \quad (24)$$

$$d_i = \left\{ \frac{16 \left[ M_{\max} + \sqrt{(T_{Q(\max)})^2 + (M_{\max})^2} \right]}{\pi \sigma_i} \right\}^{1/3} \quad (25)$$

### 2.3.11.2. Espesor de Hoja del Impulsor

El punto efectivo de aplicación del torque en el impulsor se considera aproximadamente el 75% del radio del impulsor (Uhl y Gray, 1966b).

$$\bar{R} \cong \frac{3}{4} R \quad (26)$$

donde R es el radio del impulsor

Las paletas deben ser lo suficientemente fuertes para soportar el máximo momento flector (Uhl y Gray, 1966b).

$$S = \frac{Mc}{I} \quad (27)$$

donde:

M = momento flector

I/c = módulo de sección

S = esfuerzo permisible de trabajo para el material de la paleta

Considerando que el máximo momento flector ocurre en el punto donde la paleta es acoplada al cubo, se calcula el módulo de sección requerido en este punto (Uhl y Gray, 1966b).

$$\frac{I}{c} = \frac{M}{S} = \frac{F(\bar{R} - R_h)}{S} = \frac{T_Q}{nS} \left( 1 - \frac{4}{3} \frac{R_h}{R} \right) \quad (28)$$

donde:

$n$  = número de paletas

Para cualquier configuración de sección transversa. Si las paletas son planas se tiene que (Uhl y Gray, 1966b).:

$$\frac{I}{c} = \frac{D_w D_t^2}{6} \quad (29)$$

donde:

$D_w$  = ancho de hoja del impulsor

$D_t$  = espesor de hoja del impulsor

Sustituyendo y arreglado se tiene que el espesor de paleta requerido es:

$$D_t = \left[ \frac{T_Q 6}{n S D_w} \left( 1 - \frac{4 R_h}{3 R} \right) \right]^{1/2} \quad (30)$$

Debido a que el impulsor está sujeto a altas oscilaciones de frecuencia, la fatiga puede convertirse en un problema. Para evitar esto,  $S$  será tomado como la resistencia a la fluencia del material de las paletas.

#### 2.4. Esfuerzos Mecánicos

Los esfuerzos se definen como las intensidades de las fuerzas internas actuando en áreas infinitesimales de un corte o sección en un cuerpo. En ingeniería, se acostumbra descomponer estas intensidades de fuerzas en las direcciones perpendicular y paralela a la sección en estudio. Así, la componente perpendicular a la sección se denomina *esfuerzo normal* en un punto, y se define matemáticamente como:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (31)$$

donde  $F$  es una fuerza normal al corte, y  $A$  es el área respectiva alrededor del punto. Se acostumbra denominar a los esfuerzos normales que originan tracción o estiramiento en la superficie de la sección como esfuerzos *de tensión*, en tanto que los que causan presión o empuje contra la superficie del corte se llaman esfuerzos *de compresión* (Popov, 1982).

La componente paralela a la sección de estudio se denomina *esfuerzo cortante*, definido como:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (32)$$

donde nuevamente  $A$  representa el área y  $V$  es la componente de la fuerza paralela a la sección o corte (Popov, 1982).

En la mecánica de materiales, es particularmente significativo determinar estos esfuerzos en las diversas porciones del corte en la pieza, pues la resistencia a la deformación y la capacidad de los materiales para resistir cargas dependen de estas intensidades de fuerza (Popov, 1982).

## 2.5. Propiedades Mecánicas

Una pieza de máquina o elemento estructural que se encuentre en servicio está sujeta a esfuerzos o cargas. El conocimiento de las características del material va a permitir diseñar esta pieza de tal forma que los esfuerzos o cargas a las cuales sea sometida no provoquen su fractura (Shigley y Mischke, 1990).

La resistencia de un material estructural y su deformación para una determinada carga se obtienen mediante la *prueba de tensión*, en la cual, se monitorea la carga necesaria para producir una elongación dada conforme una probeta se somete a tensión a una razón constante. El resultado inmediato de esta prueba es una curva de carga contra elongación; sin embargo, al normalizar los datos de esta curva, por geometría original de la probeta, se obtiene la curva *esfuerzo-deformación ingenieril* de la Figura 27 (Shackelford, 1995).

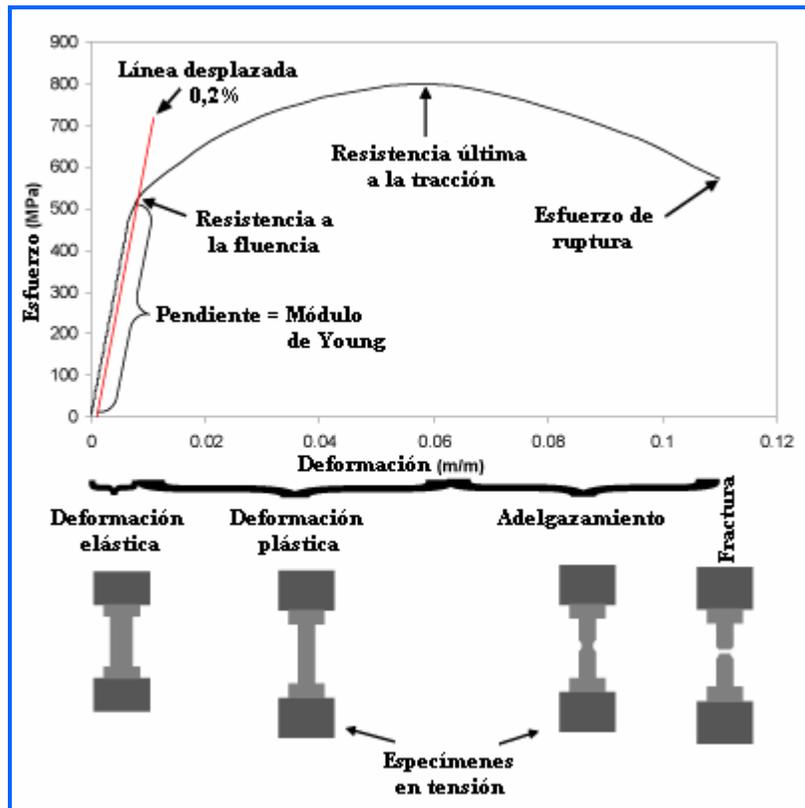


Figura 27. Curva esfuerzo-deformación obtenida a partir de un ensayo de tracción. Tomada de Amirkabir University of Technology, 2007, disponible: [www.aut.ac.ir](http://www.aut.ac.ir). Modificaciones de los autores.

En la Figura 27 se aprecian dos regiones: la región de deformación elástica y la de deformación plástica. La región elástica es la porción lineal inicial de la curva; en ésta, ocurre una deformación temporal que se recupera totalmente cuando la carga es eliminada. La región plástica es la porción no lineal generada una vez que la deformación total excede su límite elástico, en la cual tiene lugar una deformación permanente que no se recupera cuando se elimina la carga, aunque se recupera un pequeño componente elástico. Ya que con frecuencia es difícil especificar con precisión el punto a partir del cual comienza el comportamiento plástico del material, se define por convención como el punto de intersección de la curva con una recta paralela a la porción elástica y desplazada del origen 0,2% sobre el eje de deformación. Este punto se conoce como *resistencia a la fluencia* ( $S_y$ ), y representa el esfuerzo necesario para generar esta pequeña cantidad (0,2%) de deformación

permanente, o en otras palabras, muestra la resistencia del material a una deformación de este tipo (Shackelford, 1995).

A partir de la prueba de tensión se obtienen otras propiedades mecánicas: (a) el *módulo de elasticidad*,  $E$ , también conocido como *módulo de Young*, correspondiente a la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica y que representa la “rigidez” del material, esto es, la resistencia a la deformación elástica; (b) la *resistencia última a la tracción* ( $S_{ui}$ ), que corresponde al máximo valor de esfuerzo alcanzado en la curva esfuerzo-deformación ingenieril, y en el cual comienza el adelgazamiento de la probeta; (c) la *ductilidad*, cuantificada a menudo como el porcentaje de elongación en la fractura e indicativo de la habilidad del material para ser deformado plásticamente (lo opuesto a ductilidad se denomina fragilidad); y (d) la *tenacidad*, que se usa para describir la combinación de resistencia y ductilidad del material, y es definida convenientemente como el área total bajo la curva esfuerzo-deformación (Shackelford, 1995).

Cada una de las propiedades descrita puede ser traducida en *parámetros de diseño*, empleados por el ingeniero para especificar cuantitativamente los requerimientos de materiales de ese diseño (Shackelford, 1995).

## **2.6. Esfuerzos en Recipientes Cilíndricos de Pared Delgada Sometidos a Presión Interna**

El estudio de los recipientes a presión de pared delgada proporciona información acerca del comportamiento de los materiales en esfuerzo biaxial y de su resistencia a la falla. Los recipientes cilíndricos son considerados de pared delgada cuando el espesor de pared no excede la décima parte del radio interno. En tales condiciones, las paredes de un recipiente ideal se comportan como membranas, es decir, no experimentan flexión (Popov, 1982; Kohan, 1987).

Cuando un recipiente cilíndrico es sometido a presiones internas, éstas tienden a estallar el recipiente en dos direcciones. Primero, la presión total actúa causando la

ruptura a lo largo del eje longitudinal, y luego, actúa en los extremos del recipiente tendiendo a causar la fractura alrededor de su circunferencia (Kohan, 1987).

Para analizar un recipiente cilíndrico a presión, se procede a aislar un segmento del mismo, haciendo pasar dos planos perpendiculares al eje del cilindro y un plano longitudinal por dicho eje, Figura 28(a). Las condiciones de simetría excluyen la consideración de cualesquiera esfuerzos cortantes en los planos de las secciones. En consecuencia, los esfuerzos que pueden existir en las secciones del cilindro sólo pueden ser el esfuerzo normal  $\sigma_1$  o *esfuerzo circunferencial* y el esfuerzo normal  $\sigma_2$  o *esfuerzo longitudinal*, indicados en la Figura 28(b). Ambos son esfuerzos principales y sus nombres se deben a las cargas que ellos resisten en el cilindro (Popov, 1982; Kohan, 1987).

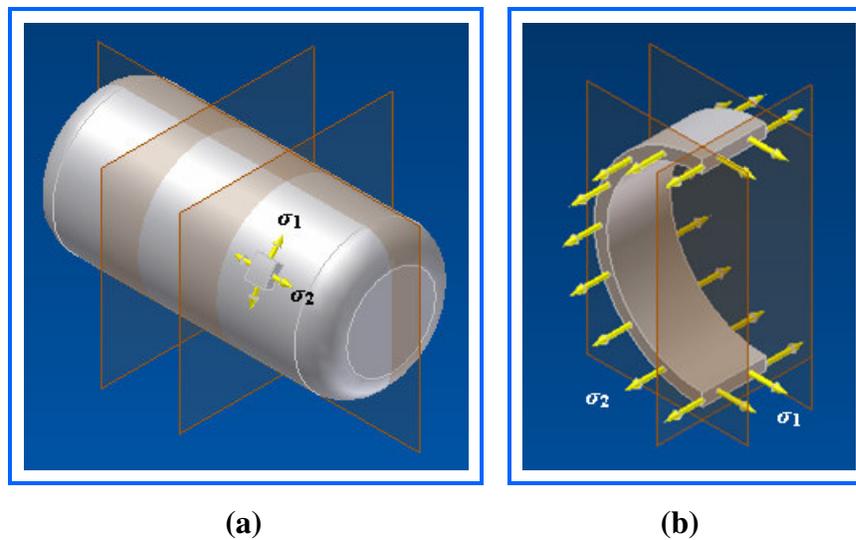


Figura 28. Esfuerzos en recipientes cilíndricos de pared delgada sometidos a presión interna: (a) Seccionamiento del recipiente y (b) Esfuerzos en la sección.

### 2.6.1. Esfuerzos Circunferenciales

La Figura 29 muestra una sección de un cilindro de diámetro interno  $d_i$ , espesor de pared  $t$  y longitud  $L$ , con una presión uniforme  $P$  actuando en todas las direcciones dentro del cilindro; de tal forma que las fuerzas creadas por dicha presión tienden a quebrar las paredes del cilindro a lo largo de su eje longitudinal. Para que el segmento

del cilindro esté en equilibrio estático, las dos fuerzas internas  $F$  deben resistir la fuerza debida a la presión interna que actúa perpendicularmente al área proyectada  $d_i L$ , sobre el plano longitudinal del segmento cilíndrico, como se ve en la Figura 29; de modo que  $2F = Pd_i L$ . Como dicha fuerza es resistida por las fuerzas originadas en el material de las secciones longitudinales, sobre cada área  $tL$ , y como el esfuerzo normal medio que se ejerce en la sección longitudinal es  $\sigma_1$ , la fuerza  $F$  resistida por las paredes del cilindro es  $\sigma_1 2tL$ . Igualando las dos fuerzas y despejando el esfuerzo (Popov, 1982; Kohan, 1987):

$$Pd_i L = \sigma_1 2tL \quad (33)$$

$$\sigma_c = \sigma_1 = \frac{d_i P}{2t} \quad (34)$$

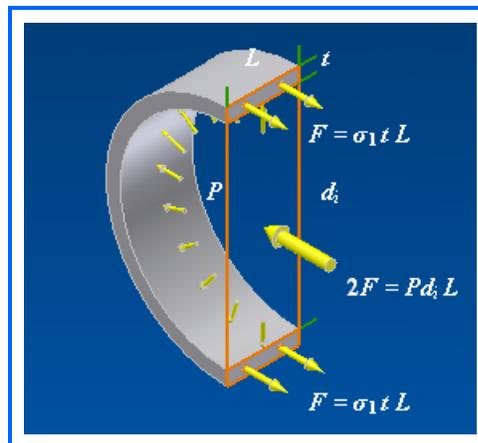


Figura 29. Esfuerzos circunferenciales y fuerzas debidas a la presión interna.

### 2.6.2. Esfuerzos Longitudinales

El otro esfuerzo normal,  $\sigma_2$ , que actúa longitudinalmente en un recipiente cilíndrico a presión, se determina resolviendo un simple problema de fuerzas axiales. Al pasar un plano a través del recipiente de manera que sea perpendicular a su eje, se obtiene un cuerpo libre como el de la Figura 30. La fuerza producida por la presión interna, que tiende a fracturar el cilindro alrededor de su circunferencia, corresponde a la presión por el área de acción,  $P\pi(d_i/2)^2$ , y la fuerza originada por el esfuerzo

longitudinal  $\sigma_2$  en las paredes, de igual forma corresponde al esfuerzo por el área de acción,  $\sigma_2 \pi d_i t$ . Igualando estas dos fuerzas para cumplir el equilibrio estático, y despejando el esfuerzo (Popov, 1982; Kohan, 1987):

$$P\pi\left(\frac{d_i}{2}\right)^2 = \sigma_2 \pi d_i t \quad (35)$$

$$\sigma_l = \sigma_2 = \frac{d_i P}{4t} \quad (36)$$

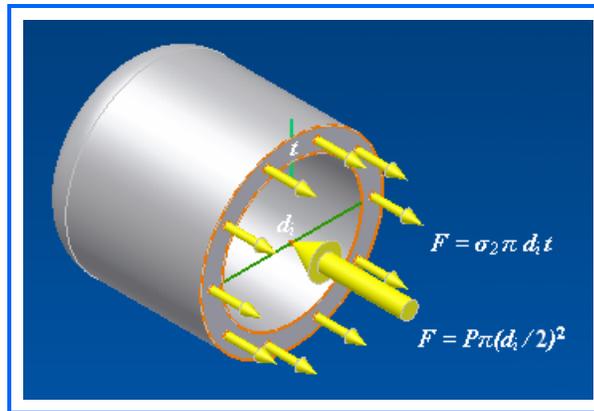


Figura 30. Esfuerzos longitudinales y fuerzas debidas a la presión interna.

## 2.7. Predicción de Fallas

Uno de los problemas que enfrenta el ingeniero de diseño es tener la certeza de que la resistencia de la pieza que se diseñe siempre sea mayor que el esfuerzo atribuido a cualquier carga que se le pueda aplicar. El término *esfuerzo permisible* se refiere al nivel de esfuerzo que se permite experimente la pieza bajo condiciones de operación, e indica el valor reducido de resistencia del material que se utiliza en el diseño para determinar las dimensiones de elementos. Esta reducción del valor de resistencia la da el factor de seguridad ( $n$ ) aplicado al diseño de la pieza (Shigley y Mischke, 1990).

$$\sigma_{perm} = \frac{S}{n} \quad (37)$$

$$\tau_{perm} = \frac{S_s}{n} \quad (38)$$

En *Diseño de elementos de máquinas* (Mott, 1995) se sugiere utilizar un factor de seguridad  $n = 2$  para estructuras estáticas hechas de materiales dúctiles, con alto grado de confianza en el conocimiento de las propiedades del material y magnitud de las cargas; para estructuras estáticas hechas de materiales frágiles, con alto grado de confianza en el conocimiento de las condiciones de operación se sugiere  $n = 3$ .

Las consideraciones precedentes acerca del esfuerzo permisible están basadas en materiales que sufren un estado de esfuerzos uniaxial, y que por tanto, se puede comparar directamente el esfuerzo experimentado con la resistencia del material (Shigley y Mischke, 1990).

Ahora bien, para una pieza sometida a carga biaxial o triaxial, la situación es más complicada debido a que la pieza está sometida a diferentes clases de esfuerzos, que ocasionan que por lo general la causa de la falla sea desconocida. En estos casos es conveniente determinar la mejor teoría o criterio para predecir la falla. Si el material a emplear es dúctil, la propiedad que se emplea es la resistencia a la fluencia, ya que una deformación permanente sería considerada una falla; en cambio, para los materiales frágiles o quebradizos se utiliza la resistencia última (Shigley y Mischke, 1990; Shigley y Mitchell, 1989).

### **2.7.1. Falla de Materiales Frágiles**

La mayoría de los materiales frágiles presentan las siguientes características: (a) la gráfica esfuerzo-deformación es una línea continua hasta el punto de falla, por lo tanto no presentan resistencia a la fluencia; (b) la resistencia a la compresión suele ser mayor que a la tracción; y (c) la resistencia última de torsión es aproximadamente igual a la resistencia a la tracción (Shigley y Mitchell, 1989).

Para predecir la falla de materiales frágiles han sido empleadas las siguientes teorías:

### 2.7.1.1. Teoría del Esfuerzo Normal Máximo

La falla ocurre cuando el esfuerzo principal máximo es mayor a la resistencia máxima del material. Si se ordenan los tres esfuerzos principales de tal forma que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , luego, esta teoría anticipa que la falla sucede cuando (Mott, 1995):

$$\sigma_1 = S_t \quad \text{o bien} \quad \sigma_3 = -S_c \quad (39)$$

Donde:

$S_t$ = resistencia a la tracción

$S_c$ = resistencia a la compresión

El factor de seguridad ( $n$ ) viene dado por la siguiente ecuación (Mott, 1995):

$$n = \frac{\sigma_1}{S_t} \quad \text{o} \quad n = \frac{\sigma_3}{S_c} \quad (40)$$

### 2.7.1.2. Teoría de Coulomb-Mohr o Teoría de la Fricción Interna

Se basa en los resultados de los ensayos de tracción y de compresión. Establece que la fractura ocurre en un estado de esfuerzo tal que se origine un círculo tangente a la envolvente de los círculos de prueba para la resistencia última a la tracción ( $S_t$ ) y la de compresión ( $S_c$ ). Si se disponen los esfuerzos principales de tal forma que  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , entonces los esfuerzos críticos serían  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$ , y estarían relacionados de la siguiente forma (Shigley y Mitchell, 1989):

$$\frac{\sigma_1}{S_t} - \frac{\sigma_3}{S_c} = \frac{1}{n} \quad \text{para} \quad \sigma_1 \geq 0 \text{ y } \sigma_3 \leq 0 \quad (41)$$

Para el caso en que  $\sigma_1$  y  $\sigma_3$  tengan el mismo signo, esta teoría coincide con la teoría del esfuerzo normal máximo (Shigley y Mitchell, 1989).

## 2.8. Proceso y Métodos de Diseño

Milani (1986) define el diseño como « un proceso cuyo objetivo es transformar los recursos en sistemas o productos para la satisfacción de necesidades de cualquier índole » (p. 13). Este proceso se puede desglosar en una serie de fases que se pueden observar en la Figura 31.

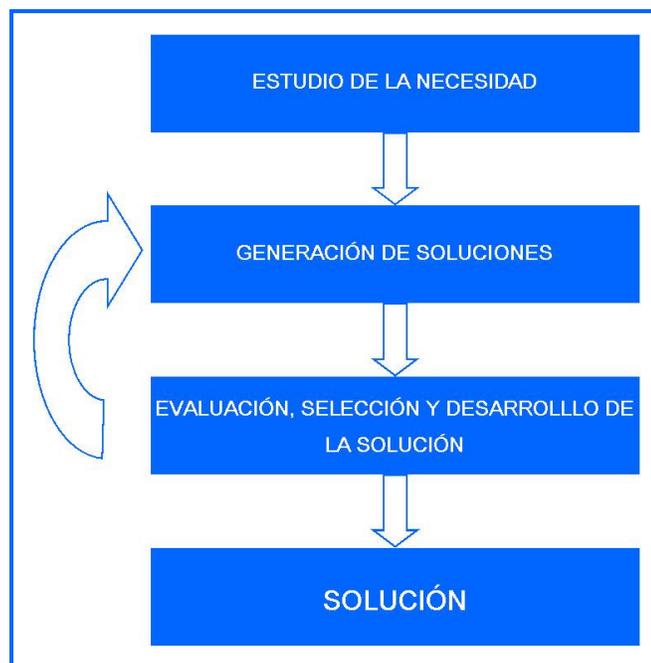


Figura 31. **Esquema del proceso de diseño.** Tomada de Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos (p.29) por Cross, 2005, México: Limusa Wiley. Modificaciones de los Autores.

El proceso de diseño comienza con el planteamiento de un problema o establecimiento de una necesidad; luego se realiza un análisis de ésta, describiendo cualitativa y cuantitativamente el problema de diseño (*Estudio de la Necesidad*); posteriormente se generan soluciones en forma de esquemas (*Generación de Soluciones o Diseño Conceptual*); se trabajan con mejor detalle los esquemas (*Dar forma a los esquemas*), y se evalúan los esquemas comparándolos con los

requerimientos y las limitaciones existentes (*Evaluación de las Soluciones*); el proceso finaliza con la comunicación de la solución (Cross, 2005; Milani, 1986).

### ***2.8.1. Método del Análisis de Funciones***

Este método se enfoca en las funciones del diseño y no en el medio que permite realizarlas. Con la aplicación de este método se establecen las funciones y los límites del sistema; mediante la consideración del problema de diseño como una caja negra que desempeña una función general a través de la conversión de entradas en salidas (Cross, 2005).

### ***2.8.2. Método de Objetivos Ponderados***

Es un método mediante el cual se evalúan y comparan las diferentes alternativas del concepto solución. El método evalúa los diferentes conceptos solución basándose en su rendimiento frente a las especificaciones u objetivos diferencialmente ponderados; para ello se siguen los siguientes pasos: (a) realizar una lista de los objetivos o requerimientos de diseño; (b) asignar un puntaje relativo de acuerdo a la importancia del requerimiento u objetivo en el diseño; (c) calificar cada diseño de acuerdo a su rendimiento en cada requerimiento u objetivo; (d) multiplicar la calificación por su valor ponderado; (e) sumar el puntaje total para cada diseño y (f) seleccionar el diseño (Cross, 2005).

## **2.9. Sellos**

Los sellos son una parte fundamental del diseño en aquellos equipos en los cuales se deba contener o excluir un fluido. A continuación se enlistan algunos de los factores a tener en cuenta en la elección del sellado (Mott, 2005):

- Naturaleza de los fluidos a contener.
- Presiones y temperaturas a ambos lados del sello.

- Movimiento relativo entre el sello y los componentes que lo rodean.
- Si es permisible algún grado de fuga.
- Vida útil del sistema.
- Mantenimiento del sellado.

En la Tabla 2 se especifica el tipo de sellado de acuerdo a la función que deba cumplir.

Tabla 2. Selección de sellos de acuerdo a la función que deba cumplir.

Función	Sello
Sellado bajo condiciones estática	Anillos "O" elastoméricos Anillo "T" Anillos huecos de metal Selladores como resinas epóxicas Silicones Calafateo con butilo
Sellado de un recipiente cerrado con movimiento relativo de alguna pieza	Diafragmas Fuelle Botas
Sellado alrededor de un vástago o pistón continuo recíproco	Sello de unión de reborde o de empaque Sello de copa U Empaque V Empaque de anillo partido
Sellado alrededor de eje giratorio	Sello de unión de reborde Sellos de álabe o leva Rascadores Sello de cara
Protección de cojinetes de piezas giratorias que soportan ejes	Sello o empaque para cojinetes
Sellado de piezas activas de una bomba para retener el fluido que se bombea	Sellos de cara Empaque en V
Sellado de piezas que rara vez se muevan	Empaques de compresión Empaque en V
Sellado entre superficies duras rígidas	Empaque elástico o flexibles
Sellado circunferencial	Sello de laberinto Sello abrasible Sello hidrostático

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de *Diseño de elementos de máquinas*, 2ª ed., (pp.367-368) por R. Mott, 1995, México: Prentice Hall.

## 2.10. Acoplamiento Magnético

El acoplamiento magnético es un sistema de transmisión de potencia desde un motor de accionamiento hasta un eje, valiéndose de fuerzas magnéticas. Dichas fuerzas se logran mediante un par de juegos de imanes permanentes, los cuales típicamente son de samario-cobalto o de neodimio-hierro-boro. Principalmente, existen dos campos de aplicación para el acoplamiento magnético: las bombas y los reactores agitados (Droctec, 2007).

En las bombas de acoplamiento magnético se utilizan dos juegos de imanes permanentes. Uno de ellos está solidariamente unido al eje de mando y se denomina imán conductor; su contraparte es el imán conducido, se encuentra en el interior de la carcasa de la bomba y es solidario al impulsor. Lo que ocurre sencillamente es que las fuerzas magnéticas de atracción y repulsión que existen entre ambos imanes son lo suficientemente fuertes como para transmitir la potencia del motor al impulsor de la bomba (Droctec, 2007).

La principal ventaja del acoplamiento magnético en bombas reside en el modo mismo de transmitir la potencia: no se requiere de un eje pasante. Por tanto, la carcasa de la bomba no requiere de un orificio atravesado por el eje de la bomba al que luego hay que sellar de algún modo para controlar las pérdidas de fluido. Además de hermeticidad, el acoplamiento magnético brinda sencillez de diseño en bombas y facilidad de montaje de las mismas (Droctec, 2007).

En el caso de los reactores agitados, el acoplamiento magnético se realiza a través de un dispositivo denominado *acople magnético* o *transmisión magnética*. En la Figura 32(a) se muestra esquemáticamente un acople magnético; éste está constituido por dos rotores provistos de imanes permanentes: el rotor exterior o imán conductor y el rotor interior o imán conducido. Una carcasa estacionaria rodea al rotor interior y lo aísla completamente del rotor exterior; ésta va fijada directamente al cabezal del reactor, enroscándola o apernándola. El eje del reactor va enroscado al rotor interior, mientras que el rotor exterior va acoplado directamente al motor. Al momento de generar el motor la potencia ocasiona el movimiento del rotor exterior, y a causa del

campo magnético generado entre los imanes el rotor interior también rota en sincronismo, transmitiéndose de esta manera la potencia hasta el eje del reactor. Una chaqueta de enfriamiento de agua protege los imanes y otros componentes de las excesivas temperaturas alcanzadas en el reactor. El uso de un acople magnético en un reactor elimina la necesidad de sellos dinámicos (Amar Equipment Pvt, s.f.)

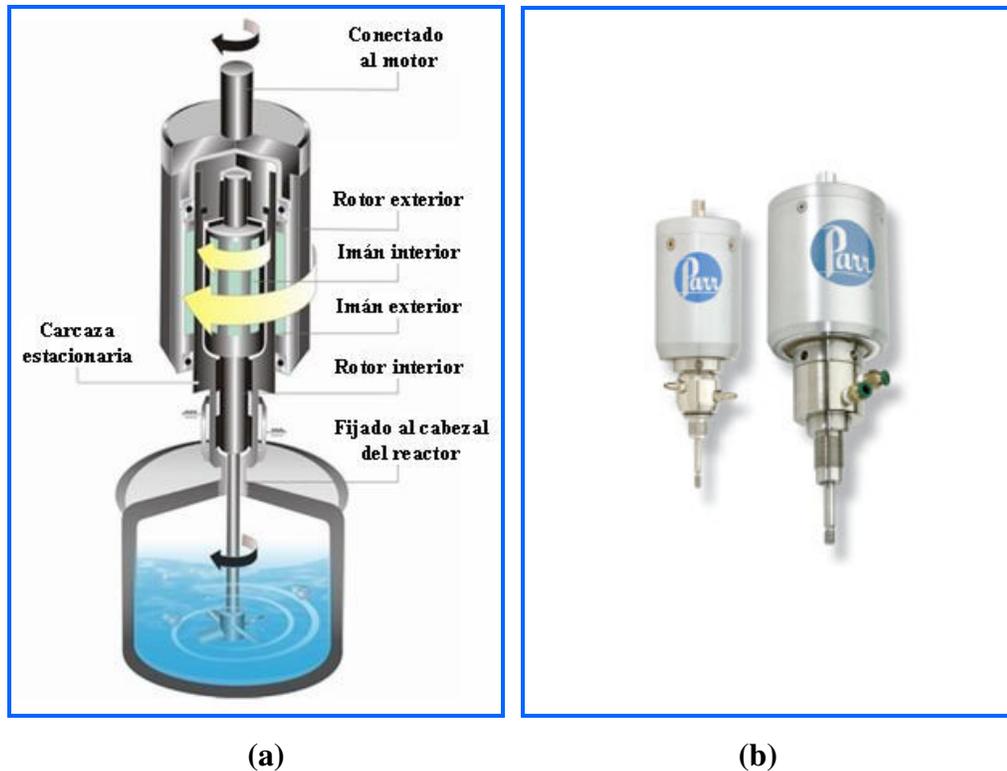


Figura 32. **Acople magnético:** (a) **Esquema de un acople magnético** y (b) **Modelo comercial**. Figura 32(a) tomada de Amar Equipments Pvt. Ltd., disponible: [www.amarequip.com](http://www.amarequip.com). Modificaciones de los autores. Figura 32 (b) tomada de Parr Instrument Company, disponible: [www.parrinst.com](http://www.parrinst.com).

Las ventajas que presentan, en los reactores agitados, los acoples magnéticos frente a las empaquetaduras y sellos mecánicos son (Amar Equipment Pvt, s.f.):

- Los sellos de empaquetaduras y mecánicos necesitan reemplazo cada 200-1.000 horas dependiendo de la aplicación; además, estos sellos tienen una considerable limitación de presión máxima de trabajo. En cambio, los acoples magnéticos pueden ser diseñados para soportar altas presiones, a la vez que no poseen piezas de repuesto que se desgasten y tengan que ser reemplazadas.

- No permiten fuga alguna de fluido, lo que implica que no requieren de paradas de operación ni de mantenimiento.
- Permiten trabajar con químicos tóxicos y peligrosos sin riesgo de fugas.
- Evitan la pérdida de líquidos costosos a través de fugas.
- Tienen una transmisión de vibraciones mínima, y por ende, un suave movimiento.
- Tienen un funcionamiento casi sin pérdidas, ya que la transmisión de potencia se realiza sin fricción.
- Debido a que son acoples flexibles, cualquier sobrecarga produce el resbalamiento del acople, con lo que se previene su rompimiento, el del eje o la falla del motor.

Los acoples magnéticos son aptos para procesos relacionados con líquidos altamente viscosos. En años recientes se han hecho progresos significativos en cuanto a materiales magnéticos y diseño del acople. En la actualidad, con la variedad de estilos de acople magnético (Figura 32(b)) y los altos torques disponibles, virtualmente todos los reactores de agitación, salvo aquellos con alguna aplicación especial, están equipados con transmisiones magnéticas (Amar Equipment Pvt, s.f.).

## 2.11. Otras Fórmulas Importantes

### 2.11.1. Densidad Promedio y Viscosidad Efectiva de una Mezcla Líquido-Líquido

La densidad promedio ( $\rho_{av}$ ) de una mezcla líquido-líquido viene dada por (Uhl y Gray, 1966a):

$$\rho_{av} = X\rho_x + Y\rho_y \quad (42)$$

Donde X e Y son las fracciones volumétricas de los fluidos a mezclar.

La viscosidad efectiva ( $\mu_m$ ) de la mezcla líquido-líquido se calcula a partir de (Uhl y Gray, 1966a):

$$\mu_m = (\mu_x)^x (\mu_y)^y \quad (43)$$

### 2.11.2. Media y Desviación Estándar

La media es una medida de tendencia central que sirve como referencia para interpretar un conjunto de observaciones. Para el cálculo de la media se suman todas las observaciones ( $x_i$ ) y se dividen entre el número de observaciones ( $n_o$ ) (Grajales, 2000).

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n_o} \quad (44)$$

La desviación estándar ( $s$ ) es una medida de la dispersión que permite evaluar la confiabilidad de la media como medida de tendencia central. Se calcula como (Grajales, 2000):

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n_o - 1}} \quad (45)$$

En este capítulo se expusieron las principales propiedades y características de los petróleos negros, los diferentes estudios de las propiedades termodinámicas y físicas que se les realizan y su comportamiento durante estos estudios.

Se presentaron los conceptos básicos de la agitación, y los principios que rigen la agitación mediante impulsores en recipiente agitados mecánicamente.

Se trató las propiedades mecánicas de los materiales, la teoría de esfuerzos en recipientes cilíndricos a presión, de pared delgada sometidos a presión interna y las teorías de predicción de fallas.

Se explicó el proceso de diseño y algunas metodologías de los mismos. Y por último se mostraron algunos aspectos importantes de la utilización de sellos y de acoples magnéticos.

En el siguiente capítulo se desarrollará el proceso de diseño del sistema de agitación y la metodología para el mismo.

**CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO**

Si bien se han propuesto numerosos modelos complejos del proceso de diseño, éstos algunas veces tienden a complicar la estructura general del mismo, sumergiéndolo en el detalle de las numerosas tareas que son necesarias en todo trabajo práctico de diseño. Por lo tanto, y en vista de que no se quería limitar el desarrollo del presente trabajo a la estructura rígida dictada por alguno de estos modelos, el proceso de diseño se basó en el modelo general y sencillo descrito en el capítulo anterior. En tal sentido, el proceso de “Diseño y Construcción del Sistema de Agitación de un Equipo Libre de Mercurio que Realiza Estudios PVT (Presión, Volumen, Temperatura) en Crudos Pesados” se realizó en las siguientes etapas:

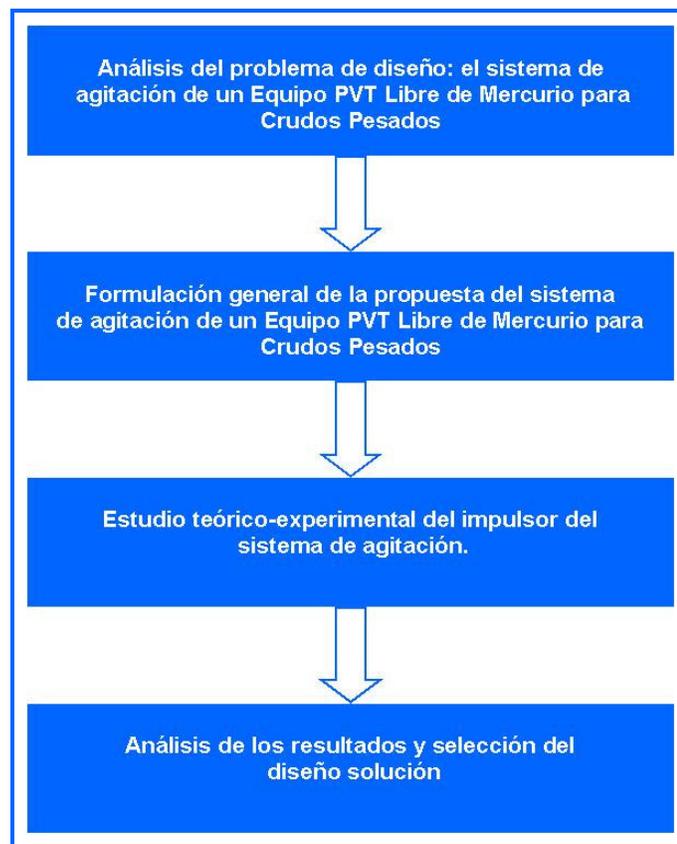


Figura 33. Metodología a desarrollar para el diseño y la construcción del sistema de agitación de un Equipo Libre de Mercurio que realiza estudios PVT en crudos pesados.

Seguidamente se expone el desarrollo de cada una de estas etapas, con lo que se describe la metodología empleada en la realización del Trabajo Especial de Grado.

### **3.1. Análisis del Problema de Diseño: El Sistema de Agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados**

En la etapa inicial del proceso de diseño se establecieron un conjunto de estrategias que permitieron entender la naturaleza del problema planteado y adquirir un amplio conocimiento sobre las características del mismo, para finalmente establecer las funciones y requerimientos del diseño.

#### ***3.1.1. Recopilación de Información Bibliográfica sobre el Petróleo Pesado y los Estudios PVT para Petróleo***

La primera fase en la etapa de análisis del problema de diseño consistió en recolectar información bibliográfica referente a: (a) propiedades y características del crudo pesado; (b) pruebas PVT; (c) comportamiento del crudo pesado durante los estudios PVT; y (d) rango de valores que deben adoptar las variables (presión, volumen y temperatura) durante los estudios PVT. Esto exigió una intensa revisión en libros, textos de cursos, informes técnicos, publicaciones científicas, trabajos especiales de grado y páginas de Internet, concernientes a fluidos de yacimientos de hidrocarburos, ingeniería de yacimientos y estudios PVT.

Esta etapa se mantuvo en ejecución aun después de comenzadas las tareas de laboratorio descritas seguidamente; una parte de los resultados de la misma está reflejada en parte del contenido de los capítulos I y II del presente Trabajo Especial de Grado.

#### ***3.1.2. Actividades en los Laboratorios de Análisis de PVT Libre de Mercurio, PVT Crudos Pesados y Análisis de Crudos Pesados***

Se realizó un entrenamiento en las actividades y el manejo de equipos de los laboratorios antes mencionados. En el Laboratorio Análisis de PVT Libre de Mercurio, se participó en el mantenimiento de rutina de los equipos PVT para crudos medianos y livianos Ruska 2370-601 Mercury-free PVT System y Fluid Eval Apparatus, de las compañías Ruska Instrument Corporation y Vinci Technologies, respectivamente. El mantenimiento de estos equipos consiste en el desmontaje y limpieza con solvente de las partes de la celda, cambio de O-rings y pistas deterioradas, limpieza de las líneas del sistema, y revisión y puesta a punto de las válvulas; para luego someter los equipos a una prueba de fuga mediante nitrógeno gaseoso, quedando listos para la realización de las pruebas. Además, se presencié la realización de pruebas PVT para petróleos livianos en los equipos anteriormente mencionados, específicamente pruebas de liberación instantánea flash, expansión a composición constante y liberación diferencial.

También se presencié la realización de las pruebas PVT antes mencionadas en el Laboratorio PVT Crudos Pesados; pero en este caso, para petróleos pesados y en equipos PVT que trabajan con mercurio.

En el Laboratorio Análisis de Crudos Pesados, se trabajó en la reincorporación del equipo PVT libre de mercurio para petróleo negro pesado de la compañía DB Robinson. Se comenzó por aprender el funcionamiento de los diferentes componentes e instrumentos que conforman el sistema, para luego realizar la puesta a punto del equipo y llevar a cabo las pruebas iniciales en un cierto crudo pesado, las cuales consistieron de procesos de liberación instantánea flash y expansión a composición constante.

El trabajo de laboratorio fue de gran importancia ya que permitió: (a) el contacto directo con los diferentes equipos PVT existentes en PDVSA Intevep, y en especial con los sistemas de agitación de estos equipos; (b) clarificar de manera experimental en qué consisten las pruebas PVT; (c) la comprensión de los resultados que éstas arrojan; y (d) observar el comportamiento del petróleo negro y en especial del crudo pesado, durante estas pruebas.

Con referencia a este último punto, se comprobó la aparición del punto de burbuja en las muestras de petróleo durante el descenso de la presión, haciéndose evidente la importancia de que la celda sea visual, para poder observar tanto este comportamiento, como los cambios de fase que experimenta el fluido durante su permanencia dentro de la celda. Además, se constató la diferencia entre el tiempo que toma realizar una prueba PVT, tal como la de expansión a composición constante, para los crudos medianos y livianos, en comparación con los crudos pesados; esto, debido a que en los crudos pesados se necesita más tiempo para alcanzar el equilibrio de las fases, y a que la alta viscosidad de estos crudos retarda considerablemente el ascenso de las burbujas que forman la capa de gas por encima del líquido.

A largo de esta fase se puso en práctica el método de diseño de *entrevistas a usuarios* (Cross, 2005), el cual se usa en la exploración de situaciones de diseño para obtener información que sólo conocen los usuarios del producto o sistema. Para el caso de este trabajo, las entrevistas se realizaron al personal de PDVSA Intevep con conocimiento y experiencia en las pruebas PVT, y consistieron en conversaciones con el Ing. Arturo Borges y con los operadores de los equipos PVT, acerca del funcionamiento, características, inconvenientes y cualquier otra información de interés referente a los equipos PVT existentes en PDVSA Intevep, y en particular sobre los sistemas de agitación de estos equipos. Este método de diseño fue de gran utilidad para determinar las ventajas y desventajas de los actuales sistemas de agitación de los equipos PVT; las mismas se presentan a continuación.

### ***3.1.3. Determinación de las Ventajas y Desventajas de los Sistemas de Agitación de los Equipos PVT para Petróleo Negro Existentes en el Mercado***

Una vez que el método de diseño de entrevistas a usuarios permitió identificar los diferentes componentes básicos de los sistemas PVT, su función dentro del equipo, así como los diversos parámetros de ajuste y medición y su comportamiento durante la operación de estos equipos, se estuvo en capacidad de realizar un estudio de los equipos PVT libres de mercurio para petróleo negro existentes en el mercado. Este

estudio se encuentra recopilado en el Informe Técnico de PDVSA Intevep número INT-11396, 2007, de nombre *Estado del arte de sistemas PVT libres de mercurio para crudos pesados y extrapesados*, elaborado por el Ing. Mauricio Sastoque, el Ing. Arturo Borges, el Br. John Tavera y la Br. Vanessa Hernández, actualmente en proceso de publicación. Dicho informe comprende la descripción de componentes, comparación de características y evaluación de la factibilidad real de aplicación en crudos pesados y extrapesados de los distintos equipos PVT para petróleo negro; además de sugerir una serie de requerimientos operacionales para los sistemas PVT libres de mercurio que trabajen con crudos pesados y extrapesados.

El mencionado estudio fue una herramienta de gran importancia en esta fase de análisis, ya que abarcó un análisis de los sistemas de agitación de los equipos PVT libres de mercurio para petróleo negro existentes en el mercado, en función de su aplicación en crudos pesados; análisis que sirvió de base para determinar las ventajas y desventajas de implementar estos sistemas de agitación en un futuro equipo PVT libre de mercurio para crudos pesados.

Del estudio se precisó que las compañías que ofertan en el mercado equipos PVT libres de mercurio para petróleo negro son: Chandler Engineering (quien adquirió los equipos PVT desarrollados por Ruska Instrument Corporation), Temco, Vinci Technologies y DB Robinson.

Seguidamente se exponen la descripción, ventajas y desventajas de los sistemas de agitación de los equipos de estas compañías, y adicionalmente, se incluye la misma información para los equipos PVT existentes en PDVSA Intevep para los análisis en crudos pesados: el sistema PVT que trabaja con mercurio, desarrollado por la compañía Ruska Instrument Corporation, y el sistema PVT libre de mercurio, desarrollado por encargo de PDVSA Intevep a la compañía DB Robinson.

#### *3.1.3.1. Equipo PVT de la Compañía Chandler Engineering*

Descripción: el sistema lo componen: (a) un imán en forma de arandela -Figura 34(a)-, suelto en el interior de la celda PVT, inmerso en el fluido de muestra y

orientado de tal manera que su eje longitudinal coincide en todo momento con el de la celda; (b) un collar magnético exterior -Figura 34(a)-, cuyo diámetro interno es mayor al diámetro externo de la celda, a fin de poder atravesarla, y cuyo eje longitudinal también coincide en todo momento con el de la celda; y (c) un motor, conectado al collar magnético mediante una barra. El motor da lugar al movimiento vertical del collar magnético exterior a lo largo de la celda; la acción del campo magnético generado por este collar permite que cuando el mismo se desplace lo haga a su vez el imán interior, agitando de esta manera la muestra, Figura 34(b). PDVSA Intevep cuenta con un equipo PVT provisto de este sistema de agitación.

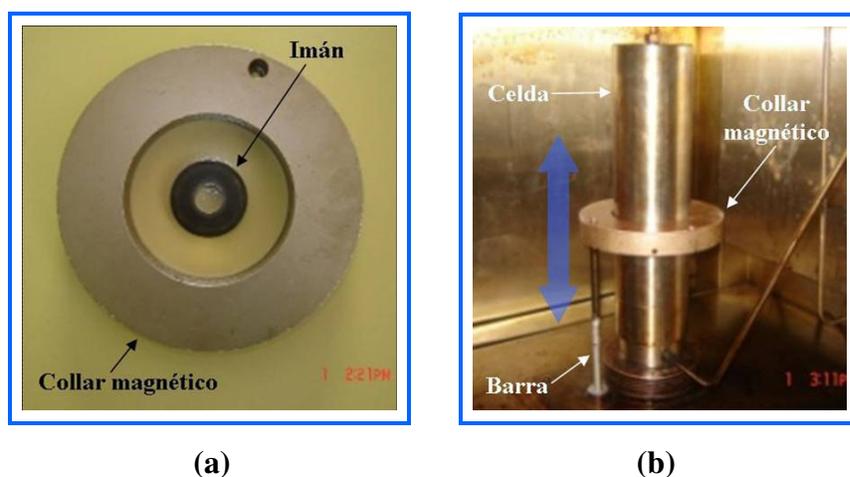


Figura 34. Sistema de agitación del equipo PVT de Chandler Engineering: (a) Imán interior y collar magnético exterior; y (b) Sistema ensamblado.

Ventajas: actúa por igual en todo el volumen de muestra y al no emplear elementos que atraviesen la celda no requiere de un mecanismo de sellado con la misma.

Desventajas: está diseñado para operar con crudos volátiles, livianos y medianos, mas no con crudos pesados ni extrapesados. Para trabajar con estos últimos, sería necesario que el collar exterior ejerciera un campo magnético lo suficientemente intenso como para vencer la gran resistencia ocasionada por la viscosidad del fluido de muestra, y así poder desplazar el imán interior. Un collar magnético de esta

capacidad probablemente implicaría complicaciones a nivel de costos y diseño dentro del sistema de agitación.

### 3.1.1.2. Equipo PVT de la Compañía Temco

Descripción: el sistema está compuesto únicamente por una armazón metálica que sirve de soporte de la celda PVT. Este soporte, a parte de mantener sujeta la celda en una posición, le permite girar en la trayectoria indicada en la Figura 35 para llevar a cabo la agitación de la muestra en el interior de la celda.

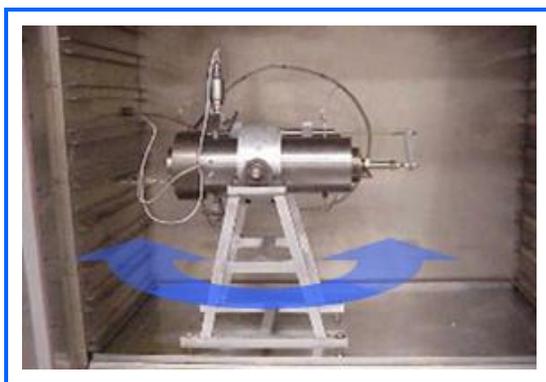


Figura 35. **Sistema de agitación del equipo PVT de Temco.** Tomada de Temco, Inc., 2006, disponible: [www.temco.com](http://www.temco.com). Modificaciones de los autores.

Ventajas: mecanismo sencillo y que al no emplear elementos que atraviesen la celda no requiere de un mecanismo de sellado con la misma.

Desventajas: no se encuentra en contacto directo con la muestra en el interior de la celda. Además, PDVSA Intevep cuenta con soportes de este tipo empleados en diversas tareas; sin embargo, se ha comprobado que como sistema de agitación de un equipo PVT para crudos pesados y extrapesados no aplican. Esto se debe a que un simple movimiento de balanceo de la celda no logra una considerable perturbación en fluidos tan viscosos como estos crudos, necesaria para facilitar la estabilización de las fases presentes.

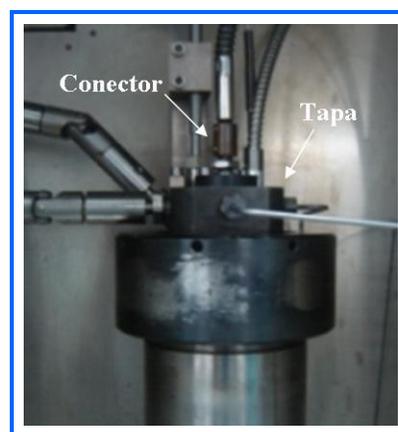
### 3.1.1.3. Equipo PVT de la Compañía Vinci Technologies

Descripción: básicamente, este sistema cuenta con un cable proveniente de los componentes internos del equipo, cuyo extremo visible termina en un conector que tiene por punta un pequeño disco con finos imanes incrustados (Figura 36 (a)), fijo a la tapa superior de la celda PVT (Figura 36 (b)). Dicha tapa además alberga un pequeño elemento agitador metálico, de forma cónica y en contacto con el fluido de muestra (Figura 36 (c) y Figura 36 (d)). El conector del cable entra por el exterior de la tapa a través de una cavidad en su centro, la cual tiene por fondo la base del elemento agitador; de modo que al estar en funcionamiento el sistema de agitación, a través del cable pasa una señal que produce la rotación del disco, que junto con el campo magnético generado entre éste y el agitador ocasionan a su vez la rotación del elemento agitador, con la consecuente perturbación del fluido de muestra.

Como el equipo tiene la capacidad de invertirse para trabajar con crudos volátiles, livianos y medianos, el agitador queda posicionado en la parte inferior de la celda durante las pruebas con petróleo. Cabe destacar que PDVSA Intevep cuenta con un equipo PVT provisto de este sistema de agitación.



(a)



(b)

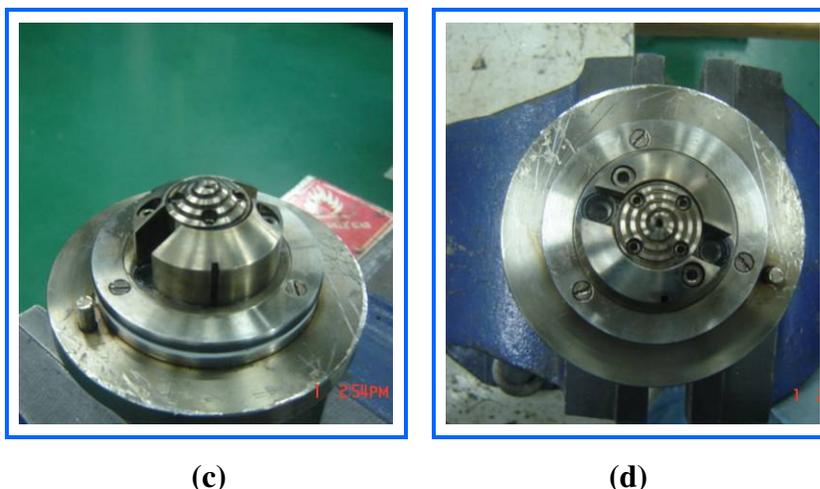


Figura 36. Sistema de agitación del equipo PVT de Vinci Technologies: (a) Conector al extremo del cable; (b) Sistema ensamblado; (c) Elemento agitador en el centro de la tapa y (d) Vista superior del elemento agitador.

Ventajas: al no emplear elementos que atraviesen la celda no requiere de un mecanismo de sellado con la misma.

Desventajas: está diseñado para operar con crudos volátiles, livianos y medianos, mas no con crudos pesados ni extrapesados. Para trabajar con estos últimos, se piensa que sería necesario cambiar el elemento agitador por uno con una forma que permita la agitación eficiente de todo el volumen de muestra en el interior de la celda, además de requerir un mecanismo que ejerciera un campo magnético lo suficientemente intenso como para vencer la gran resistencia ocasionada por la viscosidad de estos crudos sobre el elemento agitador rediseñado, y así poder hacerlo rotar a una velocidad adecuada. Un mecanismo de esta capacidad probablemente implicaría complicaciones a nivel de costos y diseño dentro del sistema de agitación.

#### 3.1.1.4. Equipo PVT de la Compañía DB Robinson

Descripción: este sistema consta de la pieza mostrada en la Figura 37: un motor DC acoplado magnéticamente a un pequeño elemento agitador metálico. Esta pieza constituye una de las tapas de la celda PVT; de manera que el elemento agitador se encuentra alojado en la cara interna de la tapa y en contacto con el fluido de muestra.

La potencia generada por el motor es transmitida al elemento agitador por la acción de un campo magnético, provocando la rotación de dicho elemento, lo que conduce a la agitación del fluido de muestra.



Figura 37. **Sistema de agitación del equipo PVT de la compañía DB Robinson.** Tomada de Schlumberger, 2005, disponible: [www.slb.com](http://www.slb.com).

Ventajas: al no emplear elementos que atraviesen la celda no requiere de un mecanismo de sellado con la misma.

Desventajas: no tiene la capacidad para trabajar con crudos pesados ni extrapesados debido a que está diseñado para agitar fluidos con un máximo de viscosidad de 1.500 cP. Para solventar la limitación de este diseño posiblemente harían falta las mismas modificaciones sugeridas en el sistema de agitación anterior.

#### *3.1.1.5. Equipo PVT de la Compañía Ruska Instrument Corporation*

Descripción: el sistema esta compuesto por: (a) un motor eléctrico, localizado sobre el contenedor de la celda PVT; (b) un sistema excéntrica-biela, el cual entra al contenedor; (c) un eje provisto de un brazo perpendicular, que en el interior del contenedor sujeta la celda por un lado; y (d) mercurio, contenido en el interior de la celda y en contacto directo con el fluido de muestra. Como se observa en la Figura 38(a), el motor está conectado al sistema excéntrica-biela, de forma que la excéntrica entra en el eje de salida del motor, mientras que el otro extremo de la biela se encuentra conectado al brazo del eje que sujeta la celda. De tal manera que cuando el motor está en funcionamiento, su eje de salida hace girar la excéntrica, la cual genera

un movimiento en la biela, que a su vez causa un movimiento angular alternativo sobre el eje de sostén de la celda. Este movimiento oscilante hace el efecto de mecer la celda para que el mercurio en su interior se desplace de un extremo al otro a través del fluido de muestra y así se produzca la perturbación del mismo, Figura 38(b).

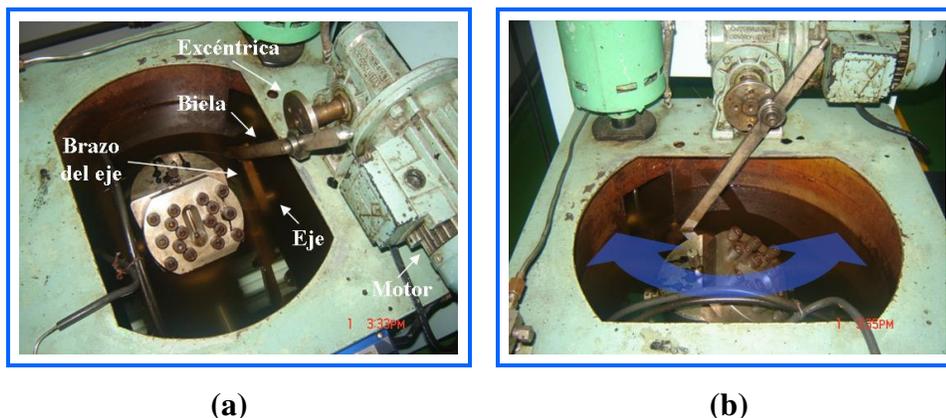


Figura 38. Sistema de agitación del equipo PVT de Ruska Instrument Corporation: (a) Componentes del sistema y (b) Movimiento de la celda.

**Ventajas:** es capaz de trabajar con crudos pesados y extrapesados, y al no emplear elementos que atraviesen la celda no requiere de un mecanismo de sellado con la misma.

**Desventajas:** emplea mercurio, cuyos inconvenientes fueron mencionados en el capítulo I. Por otra parte, durante una etapa de una prueba PVT, requiere de un largo período de tiempo en funcionamiento para permitir alcanzar el equilibrio de las fases presentes, en comparación con los sistemas de agitación que no basan su principio de funcionamiento en el balanceo de la celda. Además, dicho balanceo hace necesario que para retirar gas de la celda haya que detener el sistema de agitación y esperar un largo período de tiempo (inclusive de varias horas) a que el líquido escurra de la pared superior de la celda, pues en ésta se localiza el acceso al recipiente.

#### 3.1.1.6. Equipo PVT de la Compañía DB Robinson, Diseñado para PDVSA Intevep

**Descripción:** el sistema está compuesto por las piezas indicadas en la Figura 39 y la Figura 40: (a) un mecanismo de transmisión montado sobre el horno del equipo

(Figura 39); (b) un eje con impulsor, Figura 40(a), que penetra la celda PVT a través de su tapa superior, de manera que el extremo con el impulsor se encuentra en el interior de la celda y el otro extremo está acoplado al mecanismo de transmisión; y (c) un mecanismo de sellado dinámico, tipo prensaestopas, entre el eje agitador y la celda, Figura 40(a), alojado en la tapa superior de ésta. La función de este mecanismo es impedir la fuga de muestra a través del orificio de entrada del eje agitador a la celda, Figura 40(b). Por otra parte, el mecanismo de transmisión permite ajustar la altura de colocación del impulsor dentro de la celda, gracias a que el eje del impulsor se encuentra acoplado a un eje ranurado, conectado a su vez por medio de un disco con rodamiento a un tornillo ajustable que puede desplazarse verticalmente al ser graduado por medio de una perilla. Además, este mecanismo transfiere la potencia necesaria para la rotación del eje agitador y la consecuente perturbación del fluido dentro de la celda, a través de un motor eléctrico conectado a un par de poleas reductoras de velocidad, encargadas de dar el movimiento al eje ranurado y por ende al eje agitador.

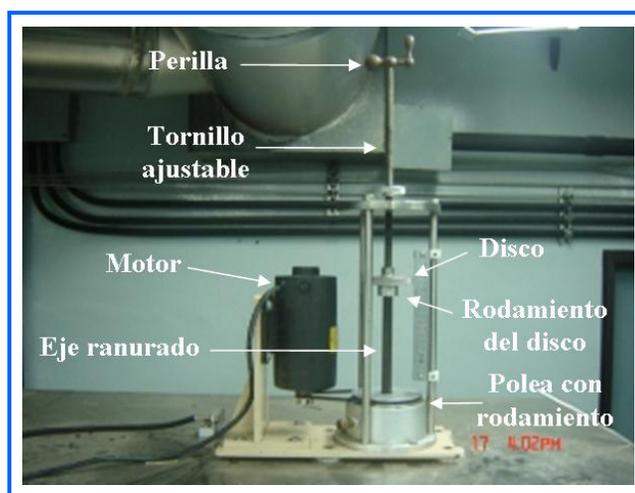


Figura 39. Mecanismo de transmisión del sistema de agitación del equipo PVT de DB Robinson diseñado para PDVSA Intevep.

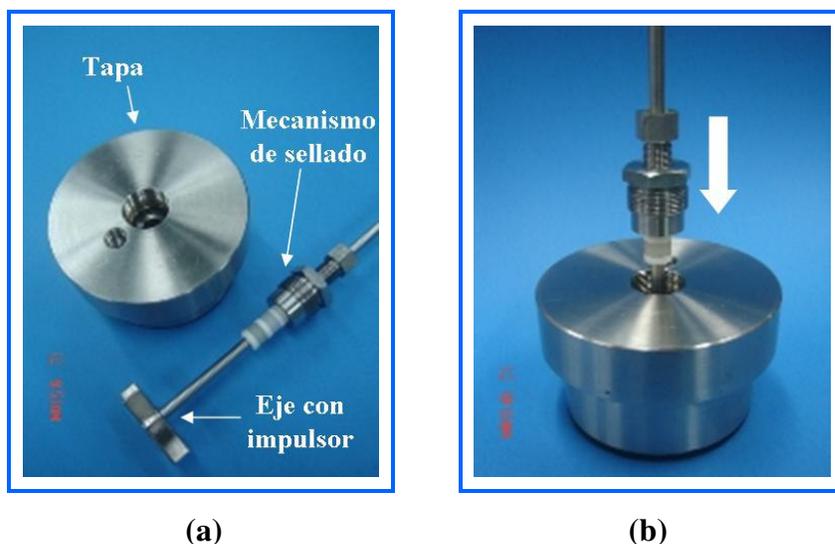


Figura 40. Sistema de agitación del equipo PVT de DB Robinson diseñado para PDVSA Intevep: (a) Tapa, eje con impulsor y mecanismo de sellado y (b) Ensamblaje del eje con impulsor y del mecanismo de sellado con la tapa.

Ventajas: permite agitar crudos pesados y extrapesados. Por otro lado, como se explicó en la descripción de este sistema, permite variar la altura de colocación del impulsor a lo largo de la celda. Además, garantiza que el impulsor se encuentre girando a la velocidad fijada, ya que el movimiento se transmite a través de cuerpos rígidos acoplados uno seguido de otro; de tal manera que se puede apreciar cualitativamente la velocidad de giro del impulsor observando el movimiento del eje saliente de la celda o el de la barra a la que está acoplado.

Desventajas: el sello prensaestopas se deteriora rápidamente, ocasionando pérdidas de muestra por fuga durante la realización de un estudio PVT. Como consecuencia, el mecanismo de sellado requiere un muy frecuente mantenimiento para reemplazar los sellos, empleándose gran cantidad de tiempo y dinero en esta actividad.

El análisis anterior demuestra el desconocimiento de la existencia en el mercado de un equipo PVT libre de mercurio que cuente con un sistema de agitación en condiciones de trabajar eficazmente con crudos pesados. La inexistencia de un

sistema de agitación de este tipo es el principal inconveniente para el desarrollo de un equipo PVT libre de mercurio para crudos pesados.

#### ***3.1.4. Propuesta del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados***

Como se ha mencionado con anterioridad, el presente Trabajo Especial de Grado es el primer paso seguido por PDVSA Intevep para el desarrollo de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados. Desde el momento en que se planteó este proyecto, el Ing. Arturo Borges se encargó de proporcionar las nociones sobre todo lo relacionado a los estudios PVT, y en particular sobre los sistemas PVT libres de mercurio, sus componentes básicos y la función de cada uno de éstos dentro del equipo. Con el objetivo de entender la naturaleza del problema y dar la definición inicial del mismo, el Ing. Arturo Borges planteó su propuesta de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados. Aunque la propuesta fue asimilada aun antes de comenzar con las etapas del proceso de análisis, es en esta fase donde se procederá a exponerla, esto con el fin de que el lector la tenga presente a la hora de que se planteen los requerimientos y la propuesta del sistema de agitación del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados.

A grandes rasgos, la visión del Ing. Arturo Borges de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados guarda mucho en común con los diseños de sistemas PVT libres de mercurio para petróleo negro existentes en el mercado; conserva los componentes básicos de estos sistemas, la mayoría de los cuales corresponden a equipos empleados en muchas otras aplicaciones de laboratorio. En líneas generales, la propuesta de dichos componentes, ilustrada en la Figura 41, es la que sigue:

- Celda PVT: entre otros atributos, la celda debe ser visual, es decir, debe permitir visualizar su interior para poder observar las diferentes fases de la muestra presentes durante la realización de los estudios PVT, y así optimizar la determinación de parámetros (por ejemplo, el punto de saturación de la muestra) y la ejecución de procedimientos de ensayo. Además, debe estar provista de un pistón interno que separe el volumen interior en dos cavidades de volumen

variable, una para albergar la muestra y la otra para el líquido que permitirá el desplazamiento del pistón. El diámetro de la celda debe estar en un rango entre 90 y 100 mm. Una celda con todas las características demandadas requiere su diseño y posterior construcción.

- Horno eléctrico: sus dimensiones deben permitirle alojar la celda PVT en su interior para proporcionarle un baño de aire caliente, regulado a través de un controlador digital.
- Bomba de desplazamiento positivo: conectada a la celda PVT, permite variar el volumen de la cavidad de la muestra, mediante la inyección o retiro de un líquido (agua o aceite) por la otra cavidad. De esta misma forma también se puede presurizar o despresurizar la celda. Las bombas modernas de este tipo indican el volumen de líquido inyectado o retirado, lo que permite determinar el cambio de volumen en la celda; además, poseen un controlador digital y una salida a computadora.
- Líneas, conectores y válvulas de alta presión: las líneas son tuberías finas que interconectan los componentes del sistema PVT y que transportan los fluidos a través de dichos componentes. Se requiere que el diseño de las líneas sea tal que posean gran flexibilidad.
- Transductores de temperatura y de presión: conectados a la celda PVT para la medición de estos parámetros en el interior de la misma; seleccionados ya que sus respuestas en forma de señal eléctrica permiten la visualización y registro de las mediciones en una computadora.
- Cámara de video y monitor: para captar y visualizar imágenes del interior de la celda durante la ejecución de los estudios PVT.
- Computadora: se pretende automatizar el sistema PVT con el propósito de centralizar en una aplicación informática la adquisición, registro y control de los parámetros de trabajo.

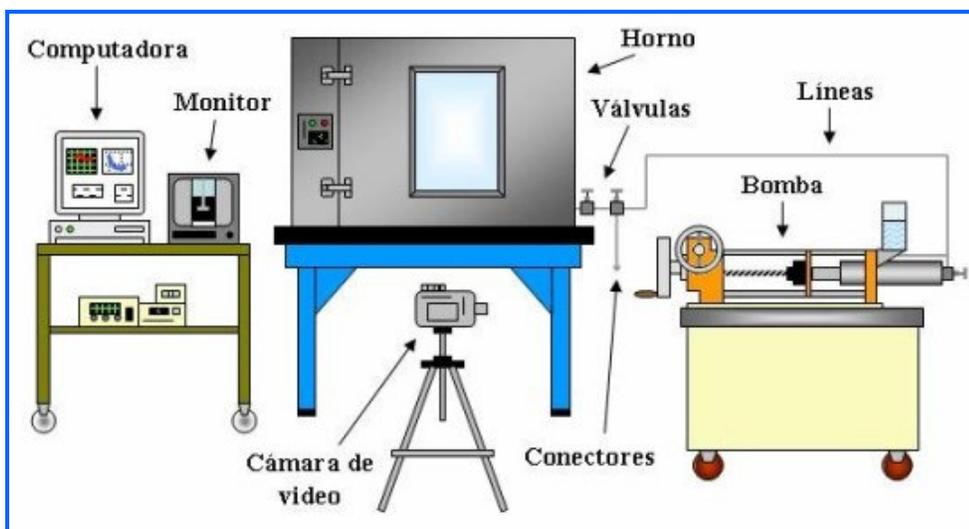


Figura 41. Propuesta del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados.

El diseño de la celda, así como la selección de la bomba, horno, transductores de temperatura y de presión, líneas, conectores y válvulas de alta presión deben considerar las condiciones de trabajo (presión y temperatura) en los estudios PVT de los crudos pesados venezolanos. Y como se mencionó en el capítulo I, estas condiciones corresponden aproximadamente a presiones y temperaturas de hasta 5.000 psi y 200 °F, respectivamente.

Se acaban de presentar los componentes básicos propuestos para el Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados; sin embargo, no se incluyó el componente crítico del equipo, correspondiente al **sistema de agitación** de la muestra, para tratarlo a continuación con detalle.

### ***3.1.5. Definición de Funciones y Requerimientos de Diseño del Sistema de Agitación***

Como se explicó anteriormente en el capítulo II, durante un estudio PVT de petróleo negro, cuando se disminuye la presión a una condición por debajo del punto de saturación (punto de burbuja) del crudo, éste ya no es capaz de mantener disuelto todo el gas que contiene, y el exceso se libera en forma de burbujas que ascienden a

través del líquido para formar una capa sobre éste. En consecuencia, por debajo del punto de burbuja cada etapa de un estudio PVT implica disminuir la presión de la muestra y esperar tanto a que se llegue al equilibrio líquido-gas como a que todo el gas alcance la capa, para así poder determinar el valor de los parámetros de medición del estudio.

En el caso particular de los crudos pesados, el proceso de liberar gas (transferencia de masa) hasta alcanzar el equilibrio líquido-gas es muy lento, y la alta viscosidad dificulta en gran manera el ascenso de las burbujas hasta la capa de gas en formación, razones por las cuales se hace necesario el empleo de un sistema de agitación que actúe sobre el fluido de muestra durante la ejecución de los estudios PVT.

Lo anterior condujo a definir **la función** que tiene el sistema de agitación del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados: disminuir lo máximo posible el tiempo tanto en que se alcanza el equilibrio líquido-gas de la muestra como en que todo el gas pasa a formar una capa sobre el líquido, luego de una despresurización de la muestra por debajo de su punto de burbuja. El fin último que se persigue con esto es reducir el tiempo de duración de las pruebas PVT.

La experiencia y las ideas del Ing. Arturo Borges en materia de equipos PVT para petróleo negro, así como las actividades desarrolladas y los conocimientos adquiridos hasta este punto, permitieron establecer **los requerimientos** operacionales para el sistema de agitación del Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados. Si bien estos requerimientos ya fueron mencionados y justificados en el capítulo I, por razones de estructuración del trabajo escrito, a continuación serán nombrados para de esta manera mantener el orden de la metodología de este trabajo y así el lector los mantenga en su mente al momento de exponer el diseño propuesto:

Operación libre de mercurio.

- Viscosidad de muestra a trabajar hasta de 6.000 cP.
- Volumen de muestra a trabajar de 600 cc
- Presión de operación hasta de 5.000 psi.
- Temperatura de operación hasta de 200 °F.
- Operación sin fuga de muestra.

- Diseño apto para el giro de la celda PVT en 180°, bajo condiciones de operación de la misma.
- Práctico ensamblaje y desarmado de los componentes.
- Mantenimiento cómodo y esporádico.

Puesto que el sistema de agitación debe actuar sobre el fluido de muestra, es conveniente considerar el entorno físico alrededor de la muestra: el fluido estará contenida dentro de la celda PVT, la cual a su vez estará alojada en el interior del horno eléctrico. Esto con el fin de tener presente los componentes con los que puede interactuar el sistema de agitación y las restricciones de espacio físico.

Con la definición de los requerimientos de diseño finalizaron las actividades de la etapa inicial de trabajo. Al término de esta etapa ya se estaba en capacidad de comenzar el proceso de diseño en sí, proceso que se expone en la siguiente etapa de trabajo.

### **3.2. Propuesta del Sistema de Agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados**

Esta etapa se inició con el proceso de *diseño conceptual*, al que le siguió el de *diseño para dar forma a los esquemas* sugeridos en el proceso previo. Estas dos fases permitieron generar un bosquejo de la solución aceptada como la más conveniente.

#### ***3.2.1. Diseño Conceptual: Alternativas para el Sistema de Agitación***

El paso inicial dentro del trabajo de diseño fue establecer el medio por el cual se suministraría la energía mecánica que va a inducir la perturbación o agitación en el fluido de muestra. Antes de evaluar los medios tradicionales empleados en los equipos PVT existentes en el mercado se buscaron alternativas no convencionales, encontrándose la *agitación a chorro* y la *agitación por burbujas*. La primera, emplea la inyección de un chorro de líquido a alta velocidad dentro de la columna del fluido a

agitar, mientras que en la segunda se inyectan numerosas burbujas de gas desde la parte inferior de la columna del fluido. Ambas se fundamentan en el mismo principio: suministrar energía mecánica a un fluido mediante la inyección de otro, para así causar la perturbación del primero. Sin embargo, estas alternativas fueron descartadas rápidamente por dos razones:

- En el caso de la agitación a chorro, para no alterar el volumen ni la composición del líquido de muestra sería necesario inyectar y retirar a la misma tasa parte del propio líquido contenido en la celda PVT, haciéndolo recircular, lo que además supondría idear una forma de bombear un considerable caudal de crudo pesado en un espacio reducido, a las condiciones de las pruebas PVT y en estado bifásico, de encontrarse la presión por debajo de la presión de burbuja.
- En el caso de la agitación por burbujas, el solo hecho de inyectar un gas dentro de la celda PVT ya supondría alterar la composición y el volumen del gas desprendido del petróleo, y como se recordará, la composición y el volumen son parámetros de medición fundamentales en los estudios PVT.

En vista de la inviabilidad de los medios de agitación anteriores, se optó por examinar el estudio anteriormente realizado a los sistemas de agitación de los equipos PVT para petróleo negro existentes en el mercado. Se determinó que el medio más adecuado para suministrar la energía mecánica causante de la perturbación del fluido era el empleado en el sistema de agitación del equipo PVT fabricado por la compañía DB Robinson para PDVSA Intevep. Como se recordará, este sistema de agitación induce la perturbación en el fluido de muestra mediante el **movimiento giratorio de un impulsor** sumergido dentro del fluido.

La elección de este elemento mecánico: eje con impulsor, como agente agitador tuvo en cuenta una serie de consideraciones: (a) dentro de los sistemas de agitación de los equipos PVT para petróleo negro disponibles en el mercado, éste ha probado ser el único mecanismo libre de mercurio capaz de trabajar con crudos pesados; (b) básicamente, un elemento mecánico de este tipo sólo requiere estar acoplado a un motor en funcionamiento para adquirir su movimiento giratorio; y (c) el eje con impulsor, el motor y las posibles piezas derivadas de la utilización de estos elementos

mecánicos, tales como: sello dinámicos, rodamientos, acoples, etc., son elementos de máquinas estudiados a lo largo de la carrera de Ingeniería Mecánica.

Una vez seleccionado el medio de suministro de energía, se pasó a generar alternativas para la transmisión de la potencia del motor hacia el impulsor. Dos alternativas surgieron: *transmisión a través de un eje* acoplado entre el motor y el eje del impulsor (ver Figura 42) y *transmisión magnética* o por *acople magnético* (ver Figura 43).

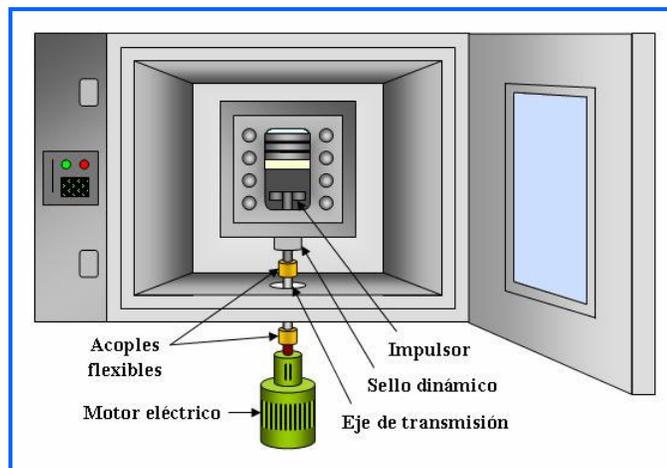


Figura 42. Transmisión de potencia a través de un eje

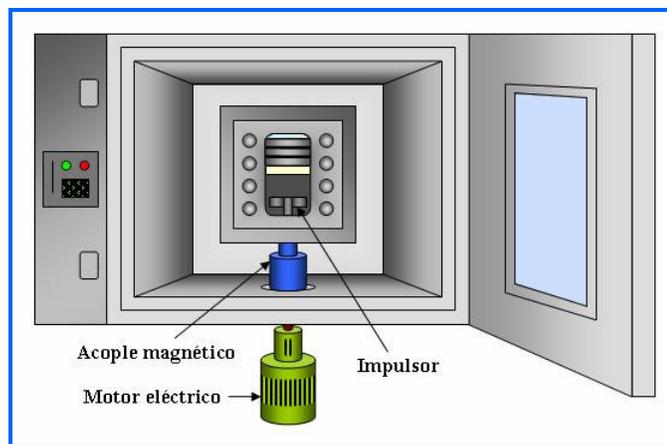


Figura 43. Transmisión de potencia magnética.

En estos primeros bocetos de la solución, se consideró que el motor debe estar situado fuera del horno. La primera alternativa, Figura 43(a), se obtuvo pensando en la forma más simple de conectar el motor con el impulsor, teniendo en cuenta tanto la condición anterior, como la conveniencia de que el eje del impulsor sea lo bastante corto, tal que evite problemas de vibraciones y de espacio dentro del horno. De aquí que el diseño contemple un **eje** que atraviesa la base del horno y que conecta, mediante **acoples flexibles**, al **motor** con el eje del **impulsor**. Sin embargo, para llevar a cabo tal conexión, es necesario que el eje del impulsor traspase la celda PVT, razón por la cual el sistema de agitación cuenta con un **mecanismo de sellado dinámico**, encargado de impedir la fuga de muestra desde el interior de la celda, estando o no el eje en movimiento; este sello va colocado en el eje del impulsor y fijado a la base de la celda.

La segunda alternativa fue producto de un proceso más complejo; éste comenzó indagando, dentro de PDVSA Intevep, sobre equipos provistos de algún mecanismo de agitación de muestra, y se encontró que en diversos laboratorios se emplean reactores agitados, para llevar a cabo procesos químicos y recombinaciones de gas de hidrocarburos con crudos, a condiciones de presión y temperatura específicas. Con el propósito de mezclar fluidos, uniformizar la temperatura de muestras u homogeneizar la muestra, estos equipos disponen de un elemento agitador en el interior del contenedor de muestra. Un motor eléctrico transmite la potencia al agitador mediante una banda o un acople flexible, en el caso de los modelos más antiguos; en el caso de los modelos modernos, a través de una especie de acople que forma parte de la propia tapa del contenedor. Para averiguar más sobre el tipo de acople de los equipos modernos, fue necesario acceder a las páginas de Internet de diferentes fabricantes de reactores agitados, y fue por esta vía que se descubrió que se trataba de una *transmisión magnética* o *acople magnético*. Toda la información recopilada, referente al acoplamiento magnético, fue presentada en la sección 2.10.

El hallazgo de un acople magnético como mecanismo de transmisión de potencia dio paso al planteamiento de la segunda alternativa de diseño, Figura 44(b). En ésta, el eje del **impulsor** se encuentra asentado en el rotor interno de un **acople magnético**;

la carcaza que recubre dicho rotor va fijada a la base de la celda PVT, mientras que el rotor externo del acople va conectado al **motor** mediante un **acople flexible**. Es importante destacar que este diseño no requiere de sellos dinámicos, pues en la abertura que comunica el interior de la celda con el exterior va asentada la carcaza del rotor interno del acople, requiriendo únicamente de un sellado estático entre las superficies involucradas para asegurar la hermeticidad de la celda.

Habiendo realizado hasta el momento el esquema de los componentes fundamentales de cada uno de los diseños, se prosiguió a desarrollar las alternativas generadas.

### ***3.2.2. Diseño para Dar Forma a las Alternativas del Sistema de Agitación***

En esta fase, el desarrollo de ambos diseños se efectuó en función de ir satisfaciendo uno a uno los requerimientos definidos para el sistema de agitación. Así, para la primera alternativa se requirió definir el tipo de sello dinámico a usar y el mecanismo que permitiría el giro de la celda PVT en 180°, estando ésta a las condiciones de presión y temperatura de las pruebas.

Respecto al sello dinámico, se llevó a cabo una investigación de los tipos de sellos empleados en los equipos de agitación; los aspectos más resaltantes de la misma fueron señalados en la sección 2.9 del capítulo II. De esta investigación se determinó que el sello prensaestopas no es adecuado ni para las presiones de trabajo ni para la condición de hermeticidad necesaria en la celda PVT. Esto explica el hecho que el sistema de agitación del equipo PVT de la compañía DB Robinson, perteneciente a PDVSA Intevep, presenta problemas de fuga de muestra durante su operación. En una búsqueda vía Internet entre diversos fabricantes de sellos para agitadores, no se encontraron sellos de este tipo cuya presión máxima de trabajo superara los 2.000 psi. Por otra parte, la investigación arrojó que el único sello dinámico que pudiera ser apto para las condiciones de presión y temperatura establecidas es un sello mecánico, con lo cual, quedó especificado el tipo de sello dinámico del diseño.

En cuanto al requerimiento de que el sistema de agitación permita, bajo condiciones de operación de la celda PVT, el giro de la misma en 180°, el principal problema es el empuje axial que la presión dentro de la celda ejerce sobre el impulsor. La alternativa, así como está planteada, no admite desacoplar el eje del impulsor del eje de transmisión para dar libertad de giro a la celda, pues de hacerlo, el empuje ejercido por la presión no tendría resistencia que impidiera expulsar el impulsor hasta que éste hiciera tope con la base de la celda; esto no sólo traería inconvenientes a la hora de llevar el impulsor a su posición inicial, sino que además, podría causarle daños al momento del impacto con la base de la celda. Y peor aún, así como está planteado el diseño, el empuje ejercido por la presión sobre el impulsor se transmite a través de su eje hasta el eje de transmisión, y de éste hasta el motor. Toda la carga axial es recibida por el motor, y esto, puede ocasionar tanto su falla como la del eje y los acoples. El diseño requirió, entonces, incluir rodamientos sobre el eje de transmisión, capaces de soportar la carga axial.

Con la selección del tipo de sello y la consideración de rodamientos para carga axial, se le dio mayor forma a la alternativa de un sistema de agitación con transmisión de potencia a través de un eje. No obstante, el diseño mejorado todavía requería de un mecanismo que impidiera el desplazamiento del impulsor, por efectos de la presión interna de la celda, al momento de desacoplar el eje del impulsor del eje de transmisión para permitir el giro de ésta.

Al llegar a este punto con la primera alternativa, se procedió a trabajar con el diseño con transmisión de potencia por acople magnético. De manera que se evaluaron los ajustes que debían hacerse al esquema original para lograr que el diseño cumpliera con los requisitos operacionales. En forma inesperada, se encontró que tal como fue concebido el esquema del diseño en la Figura 43, no eran necesarios cambios sustanciales. Bastó colocar el **acople magnético** completamente dentro del horno y agregar un **eje** que atravesase este último, para conectar, a través de un par de **acoples flexibles** en los extremos, el **motor** con la transmisión magnética. El rediseño realizado se muestra en la Figura 44.

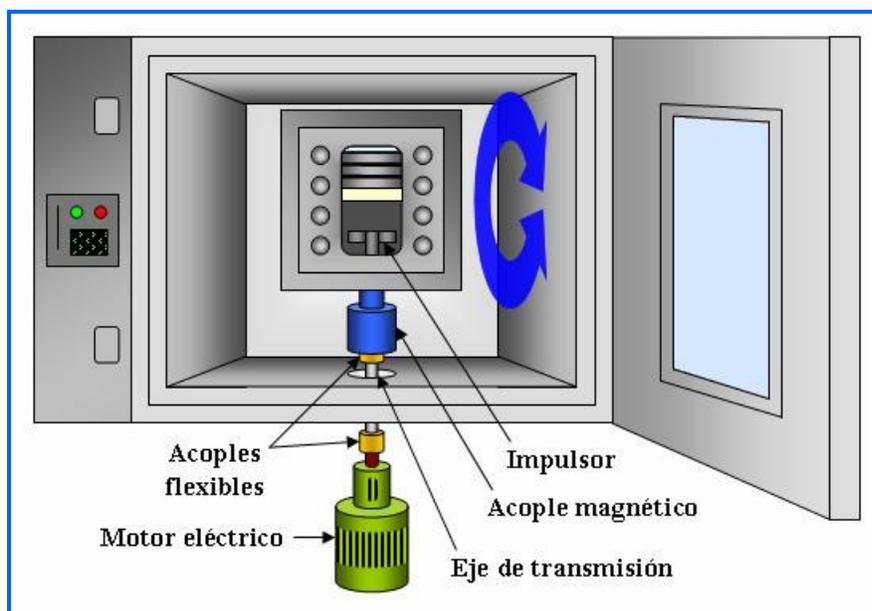


Figura 44. Diseño para dar forma al sistema de agitación con transmisión magnética de potencia.

En este caso, la simplicidad y rapidez con que se llevó a cabo el diseño para dar forma se debió a que las ventajas propias del uso de acoples magnéticos en reactores agitados se corresponden con los requerimientos establecidos para el sistema de agitación. La transmisión magnética no requiere de un sello dinámico entre el impulsor y la celda PVT, con lo que se garantiza la **operación del sistema de agitación sin fuga de muestra**. Al no necesitar un sello dinámico, y como la transmisión magnética no demanda mantenimiento, el único componente del sistema de agitación que podría necesitarlo es el motor eléctrico. Y como se trata de un sistema de agitación a escala de laboratorio, lo más seguro es que el motor a emplear sea uno de poca capacidad como para no necesitar de mantenimiento. Esto induce a pensar que el **sistema de agitación no requerirá de mantenimiento**. Por otro lado, como esta alternativa de sistema de agitación cuenta apenas con 6 componentes: impulsor, acople magnético, par de acoples flexibles, eje y motor, conectados uno tras otro, se asegura un **práctico ensamblaje y desarmado de los mismos**. Otro aspecto digno de resaltar es que al estar el acople magnético completamente dentro del horno, basta con desacoplar la transmisión magnética del eje que llega al motor para **permitirle a la celda PVT girar 180°** en la dirección indicada en la Figura 44; el

empuje ejercido por la presión sobre el impulsor y su eje no representa problema alguno, pues es soportado por el propio acople magnético fijado a la celda.

El transcurso del proceso de diseño fue encaminando, cada vez más, a la elección del sistema de agitación con transmisión magnética como solución al problema de diseño planteado. Sin embargo, hasta no saber si el acople magnético sería capaz de operar bajo las condiciones de presión y temperatura impuestas al diseño (5.000 psi y 200 °F, respectivamente), no se podía hacer tal elección. Esto motivo a realizar una búsqueda vía Internet entre varias compañías fabricantes de acoples magnéticos, mediante la cual se encontraron dos compañías cuyos acoples soportan tales condiciones: los acoples de *Parr Instrument Company* ([www.parrinst.com](http://www.parrinst.com)) operan con presiones de hasta 5.000 psi, por encima de 662 °F de temperatura, mientras que los de *Amar Equipments Pvt. Ltd.* ([www.amarequip.com](http://www.amarequip.com)) con presiones de hasta 5.000 psia, por encima de 482 °F. Una vez comprobado que un acople magnético perfectamente puede soportar las condiciones de presión y temperatura de operación estipuladas, finalmente, se seleccionó el diseño presentado en la Figura 44 como sistema de agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados.

Hasta este momento, se llevó a cabo el diseño del sistema de agitación desde la perspectiva de satisfacer ciertos requisitos de funcionamiento. Sin embargo el diseño, tal como quedó planteado, no considera ni la viscosidad máxima ni el volumen de la muestra establecidos para el funcionamiento del sistema de agitación. Más aun, tampoco considera la función específica que tiene el sistema de agitación dentro del fluido de muestra. Todo esto se debe a que tales aspectos dependen directamente del impulsor a utilizar en el sistema de agitación, elemento que no había sido analizado hasta ahora.

El diseño del impulsor, así como la determinación de sus parámetros de operación, no sólo dictaminarán la efectividad del sistema de agitación sobre la muestra, sino que también permitirán efectuar finalmente el diseño de detalles de los componentes del sistema de agitación, especificando los parámetros de operación de cada componente para la selección de un modelo comercial.

En vista de la importancia que tiene el análisis del impulsor para el cumplimiento de los objetivos propuestos que aún no se habían consumado, el presente trabajo se enfocó en el estudio teórico-experimental del impulsor del sistema de agitación.

### **3.3. Análisis Teórico-Experimental del Impulsor del Sistema de Agitación**

De aquí en adelante, y hasta llegar a la etapa de diseño de detalles, todas las actividades ejecutadas estuvieron orientadas, como meta final, a obtener un diseño de impulsor que, al actuar sobre una muestra de crudo con gas en solución de 600 cc de volumen, de hasta 6.000 cP de viscosidad, que fuera capaz de disminuir lo máximo posible el tiempo tanto en que se alcanza el equilibrio líquido-gas de la muestra como en que todo el gas pasa a formar una capa sobre el líquido, luego de una despresurización por debajo del punto de burbuja.

En vista de lo específica que es la tarea del impulsor sobre el fluido, y de las magnitudes alcanzadas por las condiciones de operación, era indispensable evaluar experimentalmente los diseños del impulsor que surgieran, a fin de precisar el más idóneo para el sistema de agitación. Se procede pues a exponer todas las fases que formaron parte del diseño, construcción y ensayo experimental de los impulsores.

#### ***3.3.1. Investigación Teórica: Recipientes Agitados Mecánicamente***

Antes de llevar a cabo las prueba experimentales, se debía contar con las bases teóricas que permitieran interpretar los resultados de ésta, más, si todavía se desconocían tanto las variables que debían manejarse como el procedimiento más adecuado para que el experimento reflejara el propósito del mismo; y más aún si el elemento sujeto a estudio debía antes idearse y construirse en función de obtener los resultados experimentales más satisfactorios posibles. Tales motivos indicaban la necesidad de comenzar la etapa de estudio del impulsor del sistema de agitación con una fase de investigación teórica.

Para abarcar todos los conocimientos necesarios se llevó a cabo una investigación teórica en materia de *recipientes agitados mecánicamente*, estableciendo como propósitos fundamentales de la misma: (a) conocer y entender los principios que rigen la agitación de fluidos mediante impulsores; (b) adquirir las nociones y criterios necesarios tanto para el diseño de impulsores como para la concepción, estructuración y evaluación de las pruebas experimentales; y (c) predecir y comprender los fenómenos a ocurrir en los ensayos experimentales, así como el comportamiento de las variables.

Puesto que esta investigación guardaba más vinculación con la Ingeniería de Procesos que con la Ingeniería Mecánica, implicó una ardua y extensa actividad de consulta en textos, publicaciones científicas y páginas de Internet relacionadas con el tema. Los resultados más significativos de esta investigación constituyen buena parte del contenido del capítulo II del presente Trabajo Especial de Grado y se verán reflejados en las actividades que se exponen a continuación.

### ***3.3.2. Diseño Conceptual: Planteamiento de los Modelos de Impulsores***

Desde un principio, las características de la celda PVT propuesta orientaban la selección del tipo de impulsor a los de tipo turbina; pues el reducido volumen interno de la celda sugería un diseño de impulsor compacto y de poca altura que le permitiera al pistón de la celda acercarse lo más posible a la base de la misma. Aunque se tuvo en cuenta el planteamiento anterior, la selección del tipo de impulsor del sistema de agitación estuvo sustentada en: (a) los rangos de viscosidad encontrados para los cuales aplica cada tipo de impulsor; y (b) la correlación gráfica referente al tipo de impulsor a emplear según la viscosidad y volumen del fluido presentes en el proceso (ver *Selección del Impulsor*, sección 2.7.3.7).

Al usar la correlación mencionada y ubicar en ésta la viscosidad y volumen establecidos en la sección 3.1.5, se observó que el tipo de impulsor resultante estaba casi en el límite entre el tipo propela y el tipo turbina. Puesto que esta gráfica (Figura 23) daba una selección preliminar cualquiera de los dos tipos aplicaba. Al verificar

este resultado con los rangos de viscosidad para cada tipo de impulsor, se llegó a la decisión de seleccionar las turbinas como el tipo de impulsor propuesto para el análisis experimental; y además se concluyó que una viscosidad de 6.000 cP era relativamente una magnitud pequeña para las viscosidades que manejan los impulsores de tipo paleta.

El siguiente paso fue la elección de los modelos de turbina a evaluar. Con respecto a este aspecto, la investigación teórica previa proporcionó los modelos básicos de turbinas: turbina de hojas planas, turbina de disco de hojas planas y turbina de hojas inclinadas. Estas turbinas se tomaron como alternativas para el diseño del impulsor; su selección se debió a varios factores:

- Son los modelos básicos de los cuales han derivados todos los demás diseños.
- Han sido los modelos más investigados durante el transcurso de los años.
- Debido a su geometría sencilla son de fácil y económica fabricación.
- Tienen una gran versatilidad de aplicación en procesos industriales.
- En el caso particular de la turbina de hojas planas es importante destacar que este modelo corresponde con el incorporado en el equipo PVT libre de mercurio propuesto por la compañía DBR.

Sin embargo, estos no fueron los únicos modelos de impulsor escogidos: una investigación vía Internet, a través de diferentes fabricantes de impulsores, arrojó la existencia de una nueva generación de impulsores, denominados impulsores de *alto rendimiento* (conocidos comúnmente con el término *Hydrofoil*). Estos impulsores se basan en un perfil de hoja hidrodinámico para desarrollar un eficiente bombeo (Paul y otros, 2004), maximizando el flujo axial y minimizando la velocidad tangencial (o cortante). Se clasifican según el valor de su relación de solidez, esto es, el cociente entre el área total proyectada de las hojas y el área del círculo que circunscribe el impulsor; y, según aumenta la viscosidad del fluido, un mayor valor del cociente anteriormente definido resulta más efectivo para proporcionar un tipo de flujo predominantemente axial (Hauke, Vidal y Blasco, s.f.).

Los impulsores de alto rendimiento tienen tres o cuatro hojas torcidas afiladas, con el ángulo en el extremo más llano que en el centro, lo que produce una velocidad más

uniforme a través de toda el área de descarga. Esta forma de las hojas resulta en un menor número de potencia y más elevado flujo por unidad de potencia en comparación con las turbinas de hojas inclinadas; además de que no generan sistemas de vórtices tan intenso (Paul y otros, 2004).

Los atributos de los impulsores de alto rendimiento les valieron su inclusión en los modelos de impulsores seleccionados para el análisis experimental. En tal sentido se escogieron dos modelos comerciales, que correspondieron a los únicos que se construyen para pequeñas aplicaciones a escala de laboratorio. La Figura 45 muestra los dos modelos: el A-310 y el A-100, ambos patentados por la compañía LIGHTNIN.

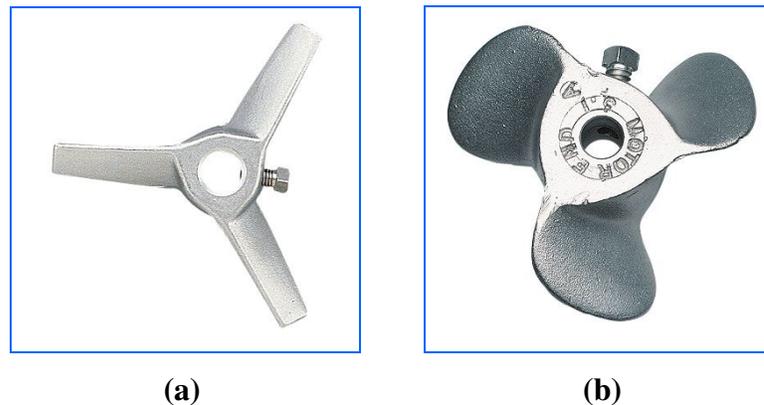


Figura 45. Impulsores LIGHTNIN de alto rendimiento seleccionados: (a) Modelo A-310 y (b) Modelo A-100. Tomada de Cole-Parmer, 1999, disponible: [www.coleparmer.com](http://www.coleparmer.com).

Luego de seleccionados todos los impulsores, se procedió a fijar las dimensiones de los modelos básicos de turbina, teniendo en cuenta que hasta el momento no se había precisado el diámetro interno del recipiente para las pruebas experimentales. Por tanto, se optó por expresar las dimensiones características de cada turbina en términos de relaciones adimensionales. Este enfoque corresponde con el tratamiento adimensional que se le da al estudio de la agitación, en el cual se considera al diámetro del impulsor ( $D$ ) como la dimensión que dicta el valor de las demás dimensiones de éste. En tal sentido, se procedió a establecer en primer lugar la magnitud de la relación  $D/T$  a usar.

Hay dos rangos en los que varía la relación  $D/T$  (Brodkey y Hershey, 1988):

$$0,2 \leq D/T \leq 0,5 \quad \text{Para flujo turbulento}$$

$$0,7 \leq D/T \leq 1,0 \quad \text{Para flujo laminar}$$

Como se desconocía el régimen adecuado para la agitación del crudo dentro de la celda PVT, se decidió tomar un valor dentro de cada rango. En el primero, se fijó un valor para la relación  $D/T$  igual a  $1/3$ , ya que éste corresponde al valor estándar establecido para esta relación en la literatura (Brodkey y Hershey, 1988; Ruszkowski, 1993). En cuanto al rango para flujo laminar, ya que no se disponía de un valor representativo dentro de este rango, se fijó como valor el correspondiente a la mitad del rango, quedando esta relación con  $D/T$  igual a  $0,85$ .

Seguidamente, se precisaron los valores de las demás dimensiones para cada turbina, teniendo en cuenta el valor estándar correspondiente a cada dimensión. En la Tabla 3 se presentan las dimensiones estándar y las propiamente establecidas para cada modelo de turbina.

Tabla 3. Dimensiones estándar y establecidas para cada impulsor tipo turbina básica.

Impulsores	Dimensión	Dimensión estándar	Dimensión establecida
Turbina de hojas planas	D/T	1/3	1/3 y 0,85
	n	6	6
	W/D	1/5	1/5
	p	90°	90°
Turbina de disco de hojas planas	D/T	1/3	1/3 y 0,85
	n	6	6
	W/D	1/5	1/5
	p	90°	90°
Turbina de hojas inclinadas	D/T	1/3	1/3 y 0,85
	n	4	<b>6</b>
	W/D	1/5	<b>1/3</b>
	p	45°	45°

Se puede observar en la Tabla 3, que para la turbina de hojas planas y la de disco de hojas planas las dimensiones fijadas se tomaron de las estándar. Esto debido a que en la variedad de publicaciones científicas revisadas no se encontró resultados contundentes que sugirieran dimensiones diferentes. Sin embargo, en el caso de las turbinas de hojas inclinadas se decidió diferir de los valores estándar, debido a

información encontrada en publicaciones científicas. Los resultados obtenidos por Kumaresan y otros (2006), con una variedad de turbinas de hojas inclinadas e impulsores de alto rendimiento, determinaron que al incrementar el número de hojas del impulsor de cuatro a seis aumentaba su capacidad de bombeo. Por otro lado, Ashwin y otros (1999) estudiaron los patrones de flujo de alrededor de cuarenta impulsores axiales (turbinas de hojas inclinadas e impulsores de alto rendimiento) y concluyeron que con un incremento del ancho de las hojas del impulsor disminuía el tiempo de mezclado de la muestra. Estas investigaciones llevaron a considerar un número de hojas y una relación W/D de 6 y 1/3, respectivamente.

En lo concerniente a los diámetros escogidos para los impulsores A-310 y A-100, éstos fueron precisados en fases más avanzadas del presente trabajo, cuando ya se conocía el diámetro interno del recipiente de pruebas. Posteriormente, serán presentados.

Cabe destacar que aunque se disponía de información considerable sobre los patrones de flujo desarrollados por los impulsores seleccionados, y sus respectivas aplicaciones dentro de los procesos industriales, no se tenía idea de cómo iba a ser el desempeño de éstos durante las prueba experimentales; peor aún, no se sabía si alguno de ellos iba a resultar apto para la agitación de crudos pesados sometidos a pruebas PVT. Esta incertidumbre era debido a que no se consiguió siquiera una aplicación que guardara relación con la tarea encomendada al sistema de agitación. No obstante, se tenía la idea de que alguno de los impulsores con descarga axial ascendente resultaría superior a todos los demás; esto debido a que probablemente una descarga de líquido hacia arriba favorecía el ascenso de gas, mientras que una descarga radial lo rompería contra las paredes del recipiente, formando burbujas de menor tamaño cuya elevación sería más lenta.

### ***3.3.3. Planificación de las Pruebas Experimentales para los Impulsores***

Una vez definidos los modelos de impulsores a ensayar, la siguiente fase correspondió a la concepción de una prueba experimental que se constituyera en el

método más preciso para simular físicamente la operación de agitación mecánica (por impulsor) de crudos pesados en estudios PVT. Siguiendo la metodología propuesta por Vilar (2006) en cuanto a *planificación de un experimento*, se llevaron a cabo las siguientes actividades.

#### *3.3.3.1. Definición de los Objetivos del Experimento*

En reiteradas ocasiones se ha expresado el objetivo final perseguido con la evaluación experimental. Sin embargo, fue en esta actividad donde se precisó el alcance real que tendrían las pruebas. Teniendo en cuenta lo discutido en la introducción de la sección 3.3, se estableció que la evaluación de los impulsores no consideraría sus capacidades para acelerar la llegada al estado de equilibrio líquido-gas de la muestra, ya que no se disponían de herramientas para controlar y caracterizar un proceso tan complejo como lo es la transferencia de masa. El mecanismo que quedó entonces para evaluar los impulsores fue la medición de sus capacidades para acelerar el ascenso del gas a través del líquido viscoso, hasta abandonarlo. Este proceso sí se podía llegar a controlar y medir cuantitativamente, a través del tiempo que transcurre hasta que el gas alcance la superficie del líquido. No obstante, se consideró que no bastaba para calificar el desempeño de los impulsores la medición del parámetro tiempo, sino que además era conveniente hacer el juicio de valor tomando en cuenta el comportamiento del gas durante el experimento. De esta manera se establecieron tres *variables respuesta* para las pruebas experimentales de los impulsores.

Al incluir el comportamiento del gas durante la operación de agitación del impulsor como criterio de evaluación, no se buscó complicar el proceso de selección del diseño solución; más bien, se esperaba que condujera a una elección en caso de que la medición del tiempo perdiera su carácter representativo.

***Identificación de todas las posibles fuentes de variación.*** Habiéndole dado forma al propósito específico de las pruebas experimentales, el siguiente paso en la

planificación del experimento consistió en *identificar todas las posibles fuentes de variación de la respuesta*. Para ello, se visualizó el proceso de agitación que habría de ocurrir durante una etapa de un ensayo PVT por debajo de la presión de burbuja (véase esta etapa en la Figura 6), y se abstraieron:

- Las propiedades físicas fundamentales del gas y del líquido cuyo comportamiento es caracterizado dentro de las pruebas PVT. Estas propiedades corresponden a: presión y temperatura dentro de la celda PVT, volumen y densidad de tanto el líquido como el gas, y la viscosidad del líquido.
- Las variables y relaciones geométricas definidas a partir de un recipiente de agitación estándar (véase la Figura 13):  $D/T$ ,  $C/T$ ,  $Z/T$ ,  $B/T$  y  $W/D$ .

De este proceso de abstracción se seleccionaron las variables que debían ser consideradas como fuentes de variación. La Tabla 4 recopila los resultados de esta actividad; se puede observar en la misma que la única relación geométrica cuyo efecto se consideró estudiar fue  $D/T$ . A las demás se les asignó el valor estandarizado para el estudio de recipientes agitados (ver sección 2.3.8); sin embargo, puesto que la celda PVT no admite mamparas la relación  $B/T$  no se toma en cuenta.

Tabla 4. Fuentes de variación para las pruebas experimentales de los impulsores.

Fuentes de variación	Variable	Nivel
Factor tratamiento cuantitativo	$D/T$	0,33 y 0,85
Factor tratamiento cualitativo	Diversos modelos de impulsores	Turbina de disco de hojas planas, turbina de hojas planas, turbina de hojas inclinadas, A-310 y A-100
	Sentido de giro del impulsor	Horario y antihorario
Unidad experimental	Sistema líquido-gas	-
Covariable	$P_C$ , $T_C$ , $\rho_L$ , $\rho_G$ , $\mu_L$ , $V_L$ y $V_G$	-

Como se puede apreciar en la Tabla 4, las propiedades físicas del gas y del líquido se tomaron como las condiciones de la unidad experimental. Llegado este punto es conveniente aclarar que se decidió no realizar las pruebas experimentales sobre una

muestra de crudo pesado y gas de hidrocarburo, debido a que la condición opaca del crudo pesado impediría la observación del fenómeno de estudio, lo que a su vez imposibilitaría la medición del tiempo de ascenso y la observación del comportamiento de la muestra. Se requería entonces de un fluido viscoso translúcido y de un gas que simularan la *unidad experimental*.

En tal sentido, era necesario asignarle a las propiedades físicas de la unidad experimental valores dentro de los que éstas alcanzan durante los estudios PVT de crudos pesados.

#### *3.3.3.2. Determinación de las Magnitudes Representativas para las Condiciones de la Unidad Experimental*

Para cada una de las propiedades su magnitud sería fijada, en la medida de lo posible, al valor que resultara más crítico para el proceso de agitación, en función del rango de valores que pudiera tomar cada variable durante los estudios PVT. De esta manera, se aseguraría el correcto desempeño del impulsor bajo las condiciones de operación más desfavorables posibles.

***Temperatura y presión del sistema líquido-gas.*** Si bien en la sección 3.1.5 quedó establecida la presión y temperatura máximas de operación del sistema de agitación en 5.000 psi y 200 °F, respectivamente, en las pruebas experimentales no se adoptaron estas magnitudes, pues demandaría el diseño y construcción de un banco de pruebas capaz de soportar tales condiciones. Puesto que las pruebas iban a requerir contener el sistema líquido-gas en alguna clase de recipiente transparente que permitiera observar el fenómeno experimental, este recipiente entonces iba a tener que soportar tales condiciones de trabajo. Un recipiente con estos atributos no está lejos de ser propiamente la celda PVT propuesta para crudos pesados; y su diseño y construcción escapan de los alcances de este Trabajo Especial de Grado.

No obstante, aunque no se tomó en cuenta de manera directa la presión y temperatura máximas fijadas para el sistema de agitación, sí se consideró el efecto

que éstas tendrían sobre las magnitudes de las demás propiedades del líquido y gas de prueba.

Por otro lado, no se quiso despreciar del todo el posible efecto que pudiera tener la presión sobre el fenómeno de agitación, razón por la cual se decidió llevar a cabo las pruebas experimentales a la presión que las actividades de planificación de las pruebas dictaran como la máxima posible; de manera que quedará especificada más adelante. Por su parte, la temperatura de trabajo para las pruebas se fijó a la temperatura estándar del laboratorio donde se iban a efectuar los experimentos, correspondiendo a 20°C (68°F).

*Viscosidad del líquido de prueba.* La gamma de viscosidades que pueden abarcar los crudos pesados a condiciones de yacimiento es amplia. Se procede a explicar el comportamiento de esta propiedad dentro de un estudio PVT, para que el lector tenga una idea de la imposibilidad de precisar siquiera un reducido rango de valores representativos. La viscosidad, como otras propiedades físicas de líquidos, es afectada tanto por la presión como por la temperatura. Un incremento de temperatura o un decremento de presión causan una disminución de viscosidad. Además, en el caso de los fluidos de yacimiento, existe otro parámetro que afecta la viscosidad: la disminución de la cantidad de gas en solución dentro del líquido causa el aumento de la viscosidad. La Figura 46 muestra el comportamiento real de la viscosidad de un cierto crudo pesado venezolano durante un estudio PVT. A presiones por encima del punto de burbuja la viscosidad del crudo decrece casi linealmente con el descenso de la presión. Sin embargo, a medida que la presión decrece por debajo de la presión de burbuja, el líquido cambia de composición y el gas se libera arrastrando las moléculas más livianas y dejando al líquido con moléculas relativamente más pesadas, lo que incrementa la viscosidad del líquido remanente.

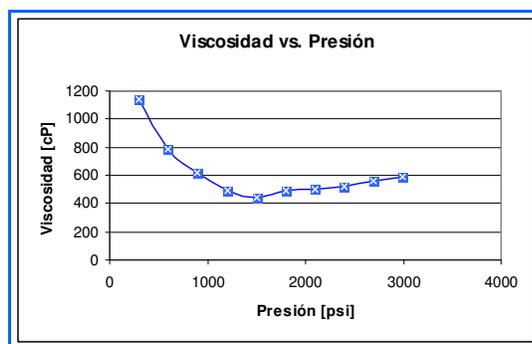


Figura 46. Comportamiento de la viscosidad de un cierto crudo pesado venezolano de 8,6 °API durante un estudio PVT a temperatura de yacimiento (122 °F).

Tal como se observa en la Figura 46, se tiene entonces que durante un estudio PVT un crudo pesado presenta un amplio rango de valores de viscosidad, debido a la reducción de presión y al cambio en la composición del líquido (por debajo del punto de burbuja). Más aún, cada crudo al que se va a someter a estudio tiene una temperatura de yacimiento y composición particular que condicionan el comportamiento de su viscosidad a otro rango.

En vista de toda la variabilidad envuelta en las viscosidades de los crudos pesados, la asignación de valores representativos de viscosidad se hizo en base a la experiencia del Ing. Arturo Borges, estableciéndose como límite máximo una viscosidad por el orden de los 6.000 cP. Cabe destacar que esta estimación se encuentra por encima de los valores hallados en los crudos pesados venezolanos, correspondiendo más bien a viscosidades observadas en crudos extrapesados. Sin embargo, su consideración se debió al hecho de que el reciente proceso de certificación de las reservas de crudo pesado y extrapesado de la Faja del Orinoco ocasionará en un futuro inmediato la caracterización PVT de crudos con tales viscosidades.

Con el propósito de abarcar de manera más completa el rango de viscosidades de los crudos pesados venezolanos, se contemplaron dos valores más: una viscosidad por el orden de 500 cP y otra por el orden de 3.000 cP. Esto tuvo como repercusión en los experimentos, que la evaluación de los impulsores considerara tres líquidos de prueba con viscosidades cercanas a las mencionadas.

**Densidad del líquido de prueba.** La densidad que debía tener el líquido de prueba a las condiciones de presión y temperatura de las pruebas debía ser lo más aproximada posible a la manifestada por los crudos pesados durante las pruebas PVT. El Ing. Arturo Borges propuso un valor por el orden de 0,9 g/cc, ya que estos crudos poseen densidades cercanas a la del agua (1 g/cc) a condiciones normales de presión y temperatura. Sin embargo, al conseguir los datos de densidad (a temperatura de yacimiento) de dos estudios PVT de liberación diferencial para crudos pesados venezolanos, se procedió a validar esta propuesta.

De los resultados de uno de los estudios, realizado a un crudo “A” de 8,2 °API, se buscó la relación presión contra densidad del líquido y se tomaron los valores de densidad correspondientes a presiones por debajo del punto de burbuja; ya que estos valores corresponden a la densidad del líquido durante el proceso de liberación de gas, es decir, cuando el sistema es bifásico. En la Tabla 5 se presentan los datos obtenidos.

Tabla 5. Relación presión-densidad del líquido para un cierto crudo de 8,2 °API a temperatura de yacimiento (datos por debajo del punto de burbuja).

Presión (psi)	Densidad (g/cc)
1.195	0,9622
1.000	0,9663
800	0,9702
800	0,9748
400	0,9786
200	0,9821

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de Informe Técnico de PDVSA Intevep.

Del mismo modo se procedió con los datos de un crudo “B” de 16,7 °API. La Tabla 6 muestra los datos extraídos.

Tabla 6. Relación presión-densidad del líquido para un cierto crudo de 16,7 °API a temperatura de yacimiento (datos por debajo del punto de burbuja).

Presión (psi)	Densidad (g/cc)
1.205	0,8932
1.000	0,8950
800	0,9011
800	0,9046
400	0,9099
200	0,9161

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de Informe Técnico de PDVSA Intevep.

Dentro de las pruebas experimentales, el valor más crítico para la densidad del líquido sería aquel cuyo efecto ocasionara el ascenso del gas en un mayor tiempo. Con base a lo explicado en la síntesis de la sección 3.10.2 del capítulo II, se esperaba que una menor diferencia entre la densidad del líquido y del gas ocasionara un ascenso más lento de este último, y como seguramente la densidad del gas sería mucho menor a la del líquido, se decidió tomar como referencia para la densidad del líquido de prueba el mayor valor presente entre los dos grupos de datos, es decir, una densidad por el orden de 0,9821 g/cc; valor sumamente próximo al propuesto por el Ing. Arturo Borges.

**Densidad del gas de prueba.** Para estimar la densidad del gas de prueba a las condiciones de presión y temperatura de las pruebas experimentales se empleó la ley de gases reales; mediante la cual se iba a calcular la densidad del gas que se libera de un crudo pesado durante una etapa de prueba PVT, teniendo en cuenta que en cada etapa la densidad del líquido varía por efecto de la composición variante del líquido.

$$\rho_G = \frac{P_G PM_G}{Z_G RT_G}$$

Para hacer la estimación, lo primero que se hizo fue precisar el peso molecular del gas desprendido en cada etapa (por debajo del punto de burbuja) de liberación diferencial para ciertos crudos pesados y extrapesados venezolanos. Para ello se consultaron informes técnicos correspondieron a tres crudos: el crudo “A” (8,2 °API), el crudo “B” (16,7 °API) y un crudo “C” de 13,7 °API. De los estudios también se extrajo la composición del gas liberado en cada etapa de prueba para cada uno de los crudos. Luego, cada composición y sus respectivas condiciones de presión y temperatura se introdujeron en una hoja de cálculo basada en el método de Hall-Yarborough para calcular el factor de compresibilidad respectivo. Teniéndose determinadas todas las variables de la ecuación, se calcularon las densidades del gas para cada etapa de prueba PVT por debajo del punto de burbuja. En la Tabla 7 se muestran todos los datos y variables obtenidas.

Tabla 7. Densidades del gas de tres crudos para cada etapa de liberación diferencial.

Crudo	Etapa	$T_G$ [K]	$P_G$ [kPa]	$PM_G$ [g/mol]	$Z_G$	$\rho_G$ [g/m <sup>3</sup> ]
Crudo "A" (8,2 °API)	1	323,15	6.894,78	20	0,8995	51.924,99
	2	323,15	5.515,82	18,48	0,9159	41.423,79
	3	323,15	4.136,87	18,7	0,9346	30.808,71
	4	323,15	2.757,91	19,23	0,9542	20.687,39
	5	323,15	1.378,96	20,25	0,9755	10.654,55
Crudo "B" (16,7 °API)	1	334,26	6.894,78	18,29	0,9094	49.733,03
	2	334,26	5.515,82	18,32	0,9258	39.080,45
	3	334,26	4.136,87	18,57	0,9413	29.269,92
	4	334,26	2.757,91	19,06	0,9582	19.674,90
	5	334,26	1.378,96	20,05	0,9770	10.149,33
Crudo "C" (13,7 °API)	1	335,37	7.584,26	17,75	0,9059	53.473,29
	2	335,37	6.205,30	17,59	0,9217	42.613,24
	3	335,37	4.826,35	17,74	0,9373	32.869,98
	4	335,37	3.447,39	18	0,9526	23.478,65
	5	335,37	2.068,43	18,45	0,9700	14.180,33

Luego de determinar las densidades, se estableció un rango aproximado que abarcara la variación de la densidad de todos los crudos, correspondiendo dicho rango a:

$$10.000 \text{ g / m}^3 < \rho_G < 54.000 \text{ g / m}^3$$

En la medida de lo posible, la densidad del gas de muestra debía estar contenida en este rango.

**Volumen del líquido y gas de prueba.** El volumen de muestra quedó especificado en la sección 3.1.5. Por volumen de muestra se considera al volumen de fluido (monofásico) de yacimiento inyectado dentro de la celda PVT y con el que se inician

los estudios. De manera que el impulsor inicia su acción sobre este volumen. Esto indica que este volumen corresponde al del líquido de prueba en los experimentos.

En cuanto al volumen del gas de prueba, éste requería determinar el volumen de gas que se libera de un crudo pesado durante una etapa de un estudio PVT. Para que este volumen sea representativo debe ser el correspondiente a las condiciones de presión y temperatura de los estudios PVT, teniendo en cuenta que éste es diferente para cada etapa. Nuevamente fue necesario extraer esta información de una prueba de Liberación Diferencial. Para ello, se consultaron los mismos tres estudios anteriores referentes a los crudos: crudo “A” (8,2 °API), crudo “B” (16,7 °API) y crudo “C” (13,7 °API). En la Tabla 8 se presenta la información extraída de los estudios, incluyendo el volumen inicial de muestra.

Tabla 8. Volúmenes de gas desprendido (presión y temperatura de los estudios) para cada etapa de liberación diferencial de tres crudos.

Crudo	Volumen inicial de muestra [cc]	Etapa	Presión [kPa]	Volumen [cc]
Crudo “A” (8,2 °API)	145	1	6.894,78	5,00
		2	5.515,82	7,47
		3	4.136,87	11,51
		4	2.757,91	9,76
		5	1.378,96	31,89
Crudo “B” (16,7 °API)	131	1	6.894,78	5,34
		2	5.515,82	9,45
		3	4.136,87	13,59
		4	2.757,91	19,88
		5	1.378,96	37,74
Crudo “C” (13,7 °API)	130	1	17,75	4,25
		2	17,59	7,14
		3	17,74	10,16
		4	18,00	14,10
		5	18,45	22,82

Puesto que ninguno de los volúmenes iniciales de muestra correspondió con el del líquido de prueba, y teniendo en cuenta que el volumen de gas liberado es proporcional al volumen del líquido al que dicho gas estaba asociado, se procedió a calcular para cada crudo, y mediante una regla de tres, cuál sería el volumen de gas

liberado correspondiente a un volumen de líquido inicial de 600 cc. En la Tabla 9 se muestran los resultados de este procedimiento.

Tabla 9. Volúmenes de gas liberado (presión y temperatura de los estudios) para cada etapa de liberación diferencial de tres crudos.

Crudo	Volumen inicial de muestra [cc]	Etapa	Volumen de gas [cc]
Crudo "A" (8,2 °API)	145	1	20,28
		2	31,32
		3	48,83
		4	67,20
		5	146,28
Crudo "B" (16,7 °API)	131	1	26,02
		2	43,19
		3	64,17
		4	94,63
		5	193,24
Crudo "C" (13,7 °API)	130	1	19,62
		2	33,18
		3	48,28
		4	66,92
		5	113,31

Como se puede apreciar en la Tabla 9, para cada crudo el mayor volumen de gas liberado calculado correspondió a la última etapa de despresurización, lo que según la teoría referente al comportamiento de hidrocarburos era de esperarse. Finalmente, se fijó el volumen del gas de prueba al valor más crítico, es decir, a aquel que representa el mayor volumen con el que debería ser capaz de trabajar el impulsor. Este valor correspondía a 193,24 cc, pero por conveniencia se aproximó a 195 cc.

### 3.3.3.3. Consideraciones para las Pruebas Experimentales

En esta actividad se concretaron las acciones que se debían tomar dentro de la ejecución experimental para garantizar que se cumpliera con el objetivo propuesto. A tal fin, se consideró que la manera más conveniente de representar la liberación del gas asociado a un crudo era mediante la inyección de burbujas del gas de prueba

desde debajo del impulsor; ya que de esta manera se garantizaría la presencia del gas a lo largo de toda la columna del líquido de prueba.

En cuanto al efecto del impulsor sobre el ascenso de un determinado volumen de gas de hidrocarburo, se determinó, que el mejor mecanismo para representar este fenómeno, sería la inyección continua del gas de prueba durante un cierto tiempo y a un cierto caudal, correspondientes con el volumen de gas ya definido; luego de lo cual, se suspendería la inyección y se procedería a contabilizar el tiempo transcurrido hasta que la última burbuja abandonara el líquido. Desde el inicio de la inyección hasta la salida de la última burbuja el impulsor estaría agitando el sistema líquido-gas.

#### 3.3.3.4. Estimación de la Velocidad Angular, Torque y Potencia de los Impulsores

Definidos los procedimientos para representar el proceso ocurrido en el sistema petróleo-gas durante una prueba PVT, se pasó a estimar el alcance de las pruebas en cuanto al régimen de flujo presente y la potencia requerida por los impulsores. Esta estimación se apoyó en las *Correlaciones para Turbinas* de la sección 2.3.9.4.

Para precisar un valor de Número de Potencia ( $N_p$ ) dentro de la gráfica (ver Figura B-1, Apéndice B), y debido a que no se disponían de valores de velocidad angular del impulsor, se tomaron los valores de Número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) que delimitan los regímenes de flujo: 10, 100, 1.000 y 10.000; con estos, se iban a realizar familias de cálculos del Número de Potencia utilizando la curva 1 de la gráfica, por presentar el comportamiento más desfavorable, es decir, por demandar mayor potencia para un valor de velocidad angular.

El Número de Reynolds ( $N_{Re}$ ) y el Número de Potencia ( $N_p$ ) son números adimensionales definidos como:

$$N_{Re} = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \quad N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$$

Despejando la velocidad angular del Número de Reynolds y la potencia del Número de Potencia se tiene que:

$$N = \frac{N_{Re} \mu}{\rho D^2} \quad P = \rho N^3 D^5 N_p$$

Se emplearon las viscosidades y densidad del líquido de prueba determinadas en la sección 3.3.3.2: 500, 3.000 y 6.000 cP, y 0,9821kg/m<sup>3</sup>, respectivamente; y los modelos de turbinas seleccionados en la sección 3.3.2, con una relación  $D/T$  de 0,3 y 0,85. Teniendo en cuenta que el diámetro del recipiente ( $T$ ) estaba en un rango entre 90 y 100 mm, se calculó el rango en que se encontraba el diámetro de las turbinas:

Para  $T = 90$  mm:  $D/T = 0,33$  y  $D = 29,7$  mm

$D/T = 0,85$  y  $D = 76,5$  mm

Para  $T = 100$  mm:  $D/T = 0,33$  y  $D = 33,0$  mm

$D/T = 0,85$  y  $D = 70,0$  mm

Habiendo fijado todos los valores necesarios, se calcularon las diferentes velocidades angulares y sus respectivos números de Potencia. Estos cálculos se presentan en las Tablas A-1, A-2 y A-3. Al observar dichos cálculos se tiene que la relación velocidad angular potencia más desfavorable se obtuvo con la mayor viscosidad y el menor diámetro del impulsor. Con este arreglo, para abarcar parte del régimen transitorio ( $N_{Re} = 100$ ), se requeriría un motor que le proporcionara una velocidad angular al impulsor de 40.000 rpm, un torque de 6.200 N.m y una potencia de 27.100 W, aproximadamente. Por tal motivo, el alcance de las pruebas experimentales se limitaría al régimen laminar, para lo cual demandaría una velocidad angular de 4.100 rpm, un torque de 0,139 N.m y una potencia de 70 W, aproximadamente.

#### **3.3.4. Diseño y Construcción del Banco de Pruebas**

Anteriormente se plantearon y definieron las pruebas experimentales a realizar para la selección del impulsor del sistema de agitación. En esta sección se describe el proceso de diseño de un banco de prueba que permita llevar a cabo dichas pruebas.

#### *3.3.4.1. Planteamiento del Problema*

La agitación es un proceso difícil de estudiar debido a la complejidad de los fenómenos de transporte que involucra y a la diversidad de diseños y configuraciones de los impulsores. Por esta razón el estudio de la agitación depende en gran medida de la experimentación (Hauke, Vidal y Blasco, s.f.).

En la sección anterior (sección 3.4) se definieron las pruebas experimentales a realizar para determinar el modelo de impulsor del sistema de agitación de un Equipo Libre de Mercurio que realiza estudios PVT en crudos pesados. Para poder llevar a cabo estas pruebas se hace necesario el diseño y la construcción de un Banco de Pruebas, surgiendo el siguiente objetivo: diseñar un Banco de Pruebas que permita analizar la influencia de la agitación impartida por diferentes clases de impulsores en el ascenso de burbujas de gas inyectadas en fluidos de variadas viscosidades.

#### *3.3.4.2. Estudio de la Necesidad*

Se realiza un estudio de la necesidad para definir las especificaciones, limitaciones, entradas, salidas y factores ambientales del Banco de Pruebas. Con esto se hace una descripción tanto cualitativa como cuantitativa del problema y se describen los atributos (especificaciones), alcances (funciones) y limitaciones del diseño (Milani, 1986).

#### ***Especificaciones del diseño***

A lo largo de la sección 3.3.3 se han planteado diversas condiciones para la realización de las pruebas experimentales, las cuales, determinan una serie de atributos que debe satisfacer el Banco de Pruebas. En la Tabla 10 se muestran estos atributos o especificaciones.

Tabla 10. Especificaciones del Banco de Pruebas.

ESPECIFICACIONES	
<b>Características generales:</b>	
Volumen del líquido de prueba	600 cc
Diámetro (T)	80 – 90 mm
Visualización de la sección de prueba	Requerido
Fácil construcción y ensamblaje	Deseable
Mantenimiento mínimo y sencillo	Deseable
<b>Condiciones de trabajo:</b>	
Impulsores:	
Turbina de disco de hojas planas	D/T= 0,3 D/T= 0,85
Turbina de hojas planas	D/T= 0,3 D/T= 0,85
Turbina de hojas inclinadas	D/T= 0,3 D/T= 0,85
Líquido de prueba	500, 3.000 y 6.000 cP
<b>Condiciones de Operación:</b>	
Temperatura	Temperatura ambiente (20°C)
Recipiente presurizado	Presión a fijar posteriormente

### ***Análisis de funciones***

Una vez definidas las especificaciones del diseño se procedió a establecer las funciones requeridas y los límites del mismo; para ello se utilizó el *Método del análisis de funciones* (Cross, 2005). El Banco de Pruebas se representó como una caja negra que realiza una función general; ésta se muestra en la Figura 47.

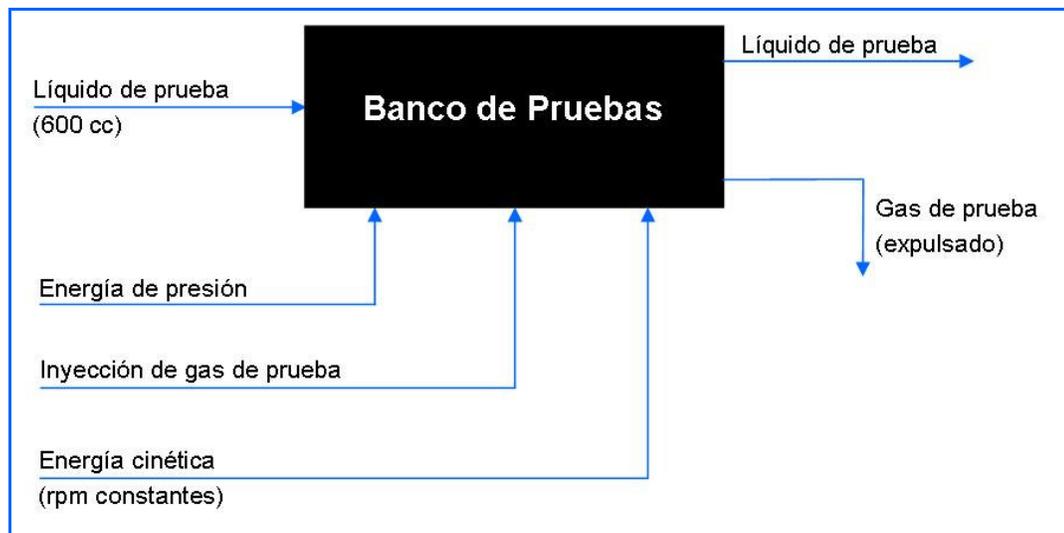


Figura 47. Modelo de caja negra para el Banco de Pruebas.

#### *Lista de funciones del banco de prueba*

Las principales funciones que debe llevar a cabo el Banco de Pruebas se puntualizan de la siguiente manera:

- Controlar el caudal y la presión de inyección del gas de prueba
- Controlar y limitar la presión del sistema.
- Agitar el líquido de prueba
- Controlar la velocidad angular de los impulsores.
- Medir el torque de los impulsores.

#### *Descomposición en subproblemas*

Al aplicar el análisis de funciones al problema de diseño, éste se desglosó en los siguientes cuatros subproblemas o subsistemas:

1. Recipiente a presión
2. Suministro de presión
3. Inyección de gas de prueba
4. Suministro de energía cinética

Dichos subsistemas inicialmente serán tratados de forma individual y luego serán agrupados para conformar una única solución.

3.3.4.3. *Generación y Evaluación de las Soluciones*

En esta etapa se encuentran soluciones para cada subsistema con el mínimo compromiso posible entre ellas, para luego evaluar y seleccionar la que se ajuste en mayor medida a las especificaciones de diseño establecidas.

**Generación de soluciones**

Se generaron soluciones para cada uno de los subproblemas planteados anteriormente: recipiente a presión, suministro de la presión, inyección del gas de prueba y suministro de energía cinética.

*Recipiente a presión*

Se buscaron varias alternativas y posibles soluciones para el diseño del recipiente a presión, las cuales se muestran en la Figura 48.

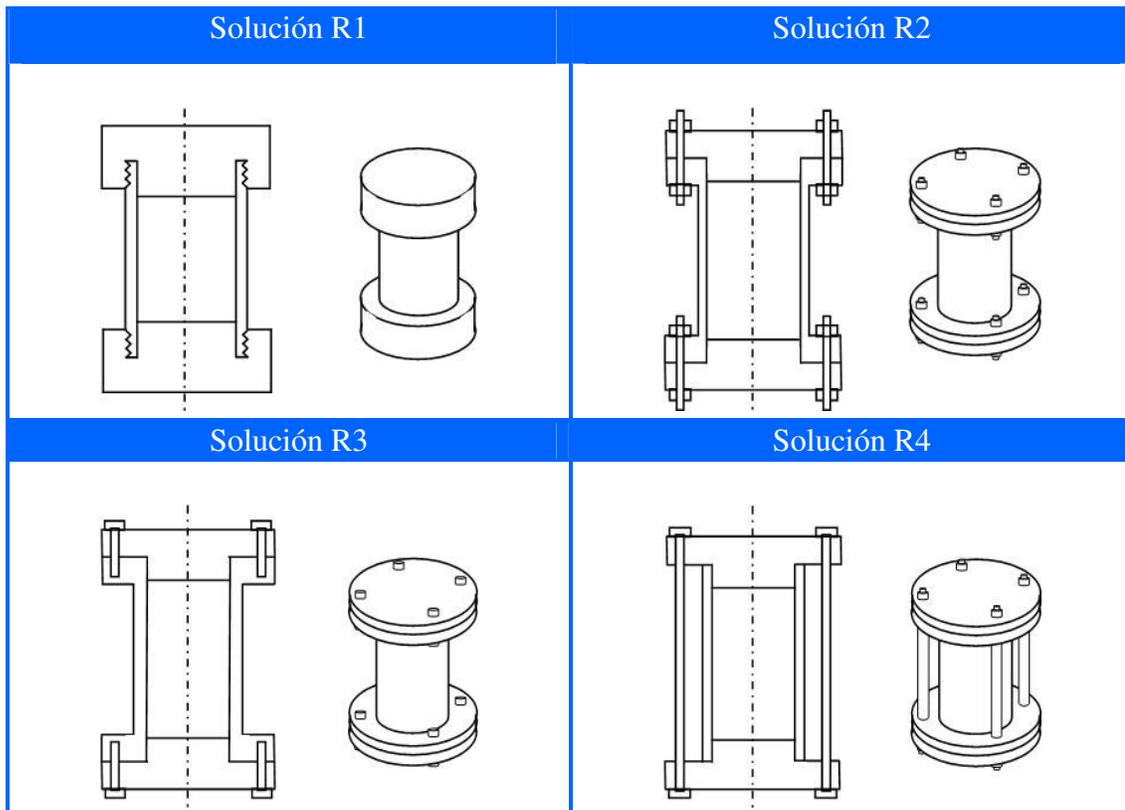


Figura 48. Soluciones propuestas para el recipiente a presión.

*Suministro de presión*

Para el suministro y control de la presión se plateó un sistema cilindro-bomba de desplazamiento positivo. El esquema del sistema se muestra en la Figura 49:

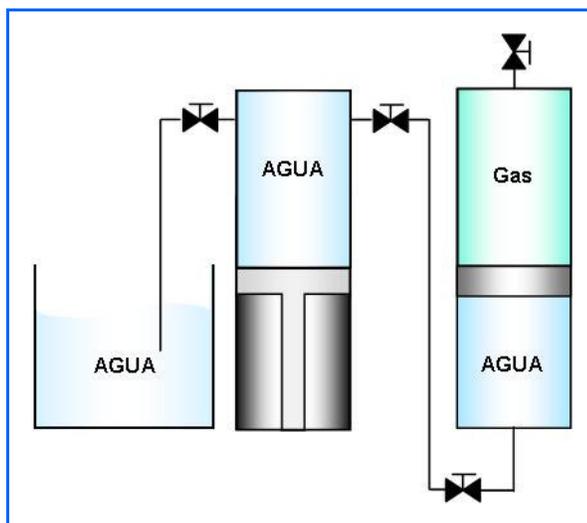


Figura 49. Sistema Cilindro – Bomba de desplazamiento positivo

El cilindro es llenado con el gas de prueba, y se conecta por uno de sus extremos a la bomba y por el otro al Banco de Pruebas. De esta forma la bomba será la encargada de suministrar y regular la presión del sistema.

*Inyección del gas de prueba*

Como se mencionó en el capítulo anterior, para la inyección de gas se suelen utilizar unos dispositivos denominados *burbujeadores*. En base a la descripción de estos dispositivos se realizó un sondeo para la generación de soluciones.

La solución I1 consiste en introducir el gas a través de un tubo con orificios y la solución I2, consiste en introducirlo a través de un filtro para solvente de baja porosidad. Ambas soluciones se presentan en la Figura 50.

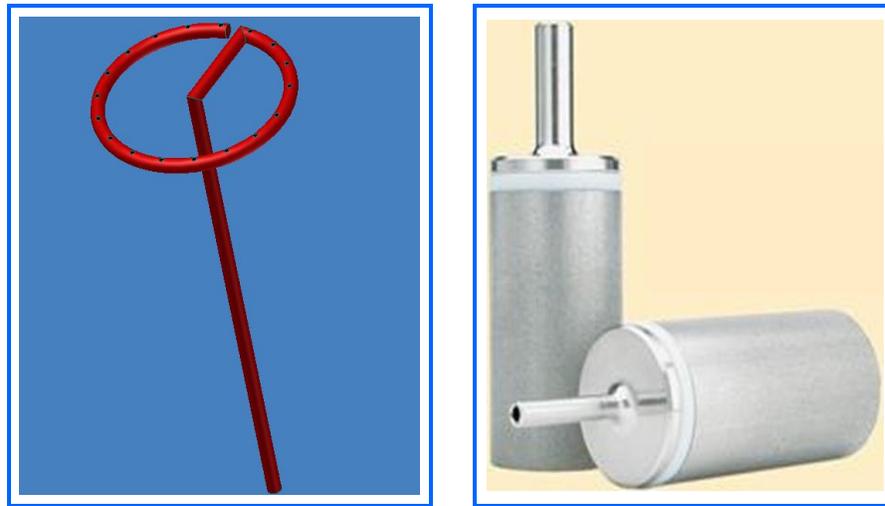
**(I1)****(I2)**

Figura 50. Solución para la inyección del gas de prueba: (I1) Tubo con orificios y (I2) Filtros para solventes.

#### *Suministro de energía cinética*

En la sección 3.3.3.4 se realizaron cálculos para estimar las condiciones de velocidad angular, torque y potencia del motor en el régimen de prueba. En base a estos cálculos se estima que el motor debe manejar como mínimo 4.100 rpm, un torque de 0,139 N.m y una potencia de 70 W. Además se desea variar la velocidad angular en un rango específico y mantenerla constante durante el desarrollo de cada ensayo. Como valor agregado sería conveniente que el motor indicara la velocidad angular y el torque.

#### *Evaluación de soluciones*

Luego de planteadas las posibles soluciones para cada subsistema se procedió a evaluar cada una.

#### *Recipiente a presión*

Para evaluar las diferentes alternativas generadas se utilizó el método de *Objetivos Ponderados*. Para ello se definieron los objetivos o requerimientos del diseño, y se

compararon entre si para determinar su importancia, y de esta forma asignarles una puntuación (Cross, 2005).

El método de comparación se basa en una matriz cuya filas y columnas están compuestas por los objetivos, al comparar pares de objetivos se asigna una puntuación de 1 ó 0, dependiendo de si el primero tiene más o menos importancia que el segundo; en caso de que ambos objetivos posean la misma importancia se asigna un puntaje de 1/2 (Cross, 2005).

Objetivos o requerimientos:

- A. Visualización
- B. Fácil construcción
- C. Fácil mantenimiento
- D. Fácil ensamblaje y desmontaje
- E. Estética
- F. Capacidad de soportar los esfuerzos producidos por las cargas

La determinación y puntuación de los objetivos se realizó con asesoría del personal del Taller Mecánico de PDVSA Intevp.

Tabla 11. Ponderación de objetivos.

Objetivos	A	B	C	D	E	F	Calificación
A	1	1	1	1	1	½	5,5
B	0	1	1	1	1	0	4
C	0	0	1	1	1	0	3
D	0	0	0	1	1	0	2
E	0	0	0	0	1	0	1
F	½	1	1	1	1	1	5,5

En base a una escala de cinco puntos se calificó cada diseño de acuerdo al requerimiento (ver Tabla 12). Después se multiplicó la calificación por su valor ponderado y se sumó el puntaje total para cada diseño. En la Tabla 13 se muestra la evaluación de las alternativas.

Tabla 12. Escala de cinco puntos para calificación de diseños

Escala	Significado
0	solución inadecuada
1	solución débil
2	solución satisfactoria
3	solución buena
4	solución excelente

Tabla 13. Evaluación de las alternativas para el recipiente a presión.

Solución		1		2		3		4	
Objetivo	Jerarquía	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación	Calificación	Ponderación
<b>A</b>	5,5	4	22	4	22	4	22	2	11
<b>B</b>	4	1	4	2	8	1	4	4	16
<b>C</b>	3	4	12	4	12	4	12	4	12
<b>D</b>	2	4	8	3	6	3	6	3	6
<b>E</b>	1	4	4	2	2	4	4	3	3
<b>F</b>	5,5	2	11	3	16,5	1	5,5	4	22
<b>Total</b>		<b>61</b>		<b>66,5</b>		<b>53,5</b>		<b>70</b>	

En base a la evaluación realizada, la solución escogida para el diseño del recipiente a presión es la número 4.

#### *Inyección del gas de prueba*

La duración de las pruebas depende del tiempo de ascenso de las burbujas, parámetro que a su vez está relacionado con el diámetro de las mismas. Es por esto que se planteó evaluar las soluciones realizando unas pruebas que permitan comparar el tamaño y comportamiento de las burbujas al inyectar nitrógeno (N<sub>2</sub>) mediante las dos alternativas.

Estas pruebas consistieron en inyectar nitrógeno en 200 cc de un patrón de viscosidad de 1.100 cP. El patrón de viscosidad se encontraba a presión y temperatura ambiente, y el N<sub>2</sub> fue inyectado a un caudal de 0,5 cc/min a una presión de 40 psi.

Para la primera solución se consultó con el Taller Mecánico de PDVSA Intevep acerca del material y el diámetro de los orificios. Las herramientas disponibles en el taller permiten hacer incisiones con un diámetro mín. de 0,5 mm. Se escogieron tubos de cobre de diámetros de 3/16 in (0,48 mm), 1/4 in (6,35 mm), 5/16 in (7,94 mm) y 3/8 in (9,53mm) con 1 mm de espesor y se les realizó un orificio de 0,5 mm a cada uno (ver Figura 51). Para la segunda solución se utilizó un filtro Solvent Filter (WAT025531) de porosidad 10 micrones (ver Figura 52).



Figura 51. Tubo de cobre con orificio de 0,5 mm.



Figura 52. Solvent Filter (WAT025531).

Al probar ambas soluciones, se observó que la primera resulta en poco tiempo de visualización, ya que los diámetros de salida de las burbujas son mayores en

comparación a los obtenidos con la segunda solución. Por otra parte la coalescencia también fue mayor al utilizar los tubos de cobre.

Lo anteriormente expuesto, aunado a las dificultades encontradas por el Taller Mecánico de PDVSA Intevep en la realización de las incisiones en los tubos de cobre, debido a sus limitados diámetros; resultó en la escogencia del filtro Solvent Filter WAT025531 por ser el que mejor se ajusta a las condiciones.

#### 3.3.4.4. Propuesta y Desarrollo del Concepto Solución

Una vez que se ha generado una solución para cada subproblema se planteó un esquema de la solución final. El elemento central de dicho esquema es el recipiente a presión, ya que el motor, el filtro y el sistema para el suministro de la presión (bomba y cilindro) deben acoplarse a él. En la Figura 53 se muestra el esquema de la solución final propuesta.

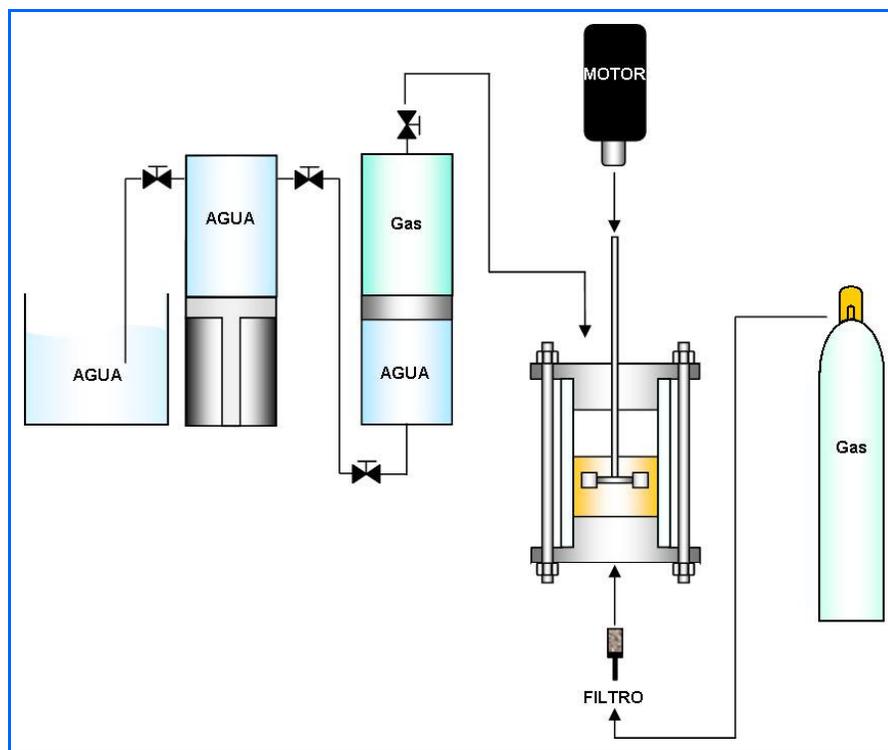


Figura 53. Propuesta para el Banco de Prueba.

Partiendo del esquema presentado en la Figura 53, se determinaron la disposición, los materiales, las dimensiones y se prepararon los planos correspondientes. Esta parte del proyecto se realizó en conjunto con el Taller Mecánico de PDVSA Intevep, quien prestó asesoría en cuanto a selección de materiales, dimensionamiento y procesos de construcción, además de ser el encargado de la fabricación.

### ***Selección de materiales***

Se procede a seleccionar los materiales del recipiente a presión y sellos, para esta selección, tanto el recipiente a presión como los sellos, son separados en base a la función que van a realizar.

### ***Celda del recipiente a presión***

Es la sección visual del banco de prueba, por lo que la celda debe ser totalmente transparente. El material seleccionado es el polimetacrilato (PMMA), conocido comúnmente como acrílico. El acrílico es un termoplástico que tiene una buena resistencia a la intemperie, con absorción de la luz visible igual a cero y dispersión de la luz tan baja que para los propósitos prácticos la transparencia es perfecta, por estos motivos fue seleccionado (Birley y Sooh, 1982). En la Tabla 14 se presentan algunas de las propiedades mecánicas del acrílico.

Tabla 14. Propiedades mecánicas del acrílico.

Elongación	Módulo de Tensión		Resistencia a la tracción <sup>a</sup>		Resistencia a la compresión		Fatiga
(2 - 10)%	Mpa	2.700 - 3.200	Mpa	34 – 70	Mpa	110	Excelente, capaz de resistir ciclos de cargas de compresión y tracción de 35 MPa (5.000 psi) indefinidamente.
	Kpsi	392 - 465	Kpsi	5 – 10	Kpsi	16	

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de *Polymers: structure and properties* (p.77) por C. Daniels, 1989, s.l.: Technomic Publishing CO.

<sup>a</sup> Datos tomados de *Diseño en ingeniería mecánica* (p.242) por J. Shigley y C. Mischke, 1990, Mexico: McGraw-Hill.

La curva de tracción del acrílico (ver Figura 54), muestra que es un termoplástico que puede soportar una gran tensión pero no mucha elongación antes de su ruptura, por lo cual es un material quebradizo.

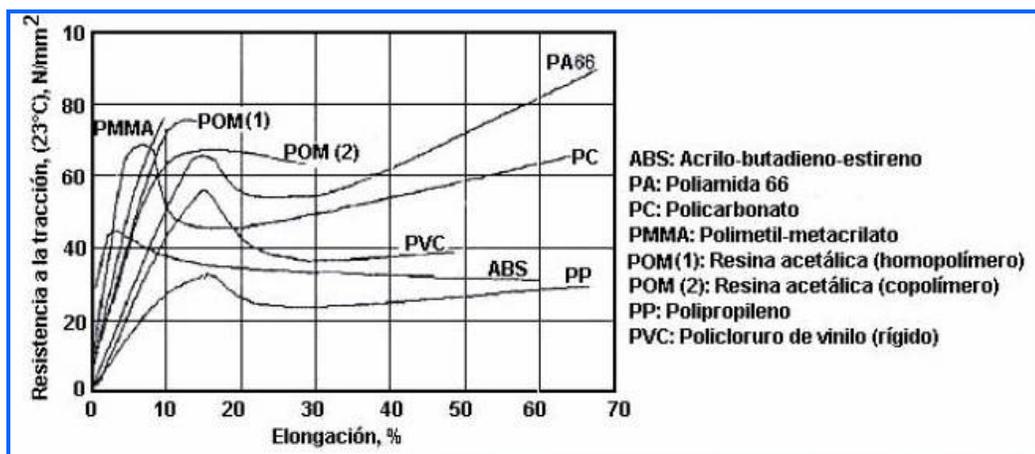


Figura 54. Curva de tracción de termoplásticos. Tomada de Polímeros, disponible: [www.utp.edu.co/~publio17/](http://www.utp.edu.co/~publio17/)

#### *Tapas y barras soporte del recipiente a presión*

Las tapas y barras soporte deben de tener buena resistencia mecánica, tratando de mantenerse livianos para no agregarle peso al sistema. Los materiales preseleccionados fueron el aluminio y el acero inoxidable. A continuación se presenta una tabla de comparación de los materiales.

Tabla 15. Comparación entre el aluminio y el acero inoxidable.

Material	Ventajas	Desventajas
Aluminio	Ligero Buena resistencia a la corrosión Buen aspecto	Difícil de soldar Poca resistencia
Acero Inoxidable	Excelente resistencia a la corrosión Alta resistencia Buen aspecto Fácil de soldar	Pesado

El aluminio es una buena opción por su ligereza (la densidad del aluminio es aproximadamente 1/3 de la del acero), pero la dificultad que presenta a la hora de soldarlo hizo que se prefiriera el acero inoxidable por encima de él.

El acero inoxidable seleccionado es el AISI 316, en la Tabla 16 se presentan las propiedades mecánicas de este material.

Tabla 16. Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable AISI 316.

Elongación	Resistencia a la tracción		Resistencia a la compresión		Punto de cedencia		Dureza Rockwell B
(40)%	Mpa	515	Mpa	170	Mpa	205	95
	Kpsi	75	Kpsi	25	Kpsi	30	

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de Azom, 2007, [Página web en línea], disponible en: <http://www.azom.com>

### *Sellos*

Con el fin de evitar la fuga de los fluidos se dividió el sellado de acuerdo a su función en: sellado de los pistones de las tapas y filtro, y sellado del eje del impulsor.

Pistones de la tapas y filtro: estas piezas se encuentran estáticas y el sellado tiene que evitar la salida de los fluidos, por lo que se seleccionó un anillo elastomérico tipo “O” (O-Ring).

Eje del impulsor: esta pieza se encuentra en movimiento de rotación, con una velocidad angular de hasta 4.100 rpm aproximadamente y debe evitar la fuga del gas de prueba, por lo que se seleccionó un sello tipo estopera.

### *Equipos y accesorios*

Para el funcionamiento del Banco de Prueba se requiere de una serie de equipos y accesorios como: bomba de desplazamiento positivo, cilindro contenedor de gas, motor, líneas, válvulas, tuercas y arandelas. A continuación se van a mostrar los componentes seleccionados.

*Bomba de desplazamiento positivo*

La bomba de desplazamiento positivo a utilizar es una ISCO 500D, la cual tiene una capacidad de 507 ml y una presión máxima de trabajo de 3.750 psi. La bomba puede funcionar en diferentes modos, entre ellos el de presión constante, en el cual suministra o retira agua a medida que la presión descienda o aumente, respectivamente.



Figura 55. **Bomba ISCO 500D.**

*Cilindro contenedor de gas*

El cilindro seleccionado es tipo pistón, de acero inoxidable, con una capacidad de 700 cc y una presión máxima de trabajo de 2.000 psi a 80 °C.



Figura 56. **Cilindro tipo pistón.**

*Motor*

Se escogió un motor eléctrico de corriente continua Caframo Modelo BDC6015, el cual posee una potencia máxima de salida de 1/5 HP (150 W) y opera en un rango de velocidad de 40 - 6.000 rpm con un torque máximo indicado en la Tabla 17.

Tabla 17. Velocidad angular y torque máximo para rangos de baja y alta velocidad.

BDC6015 [40-6.000] rpm	Velocidad angular [rpm]	Torque [N.cm]
Rango de Baja Velocidad	40-1.168	170
Rango de Alta Velocidad	412-6.000	34

Nota. Tabla elaborada con datos tomados del Catálogo Caframo.

La Figura 57 y la Figura 58 muestran el comportamiento del torque y la velocidad angular del motor cuando éste es operado continua e intermitentemente; la Figura 59 muestra las dimensiones del motor.

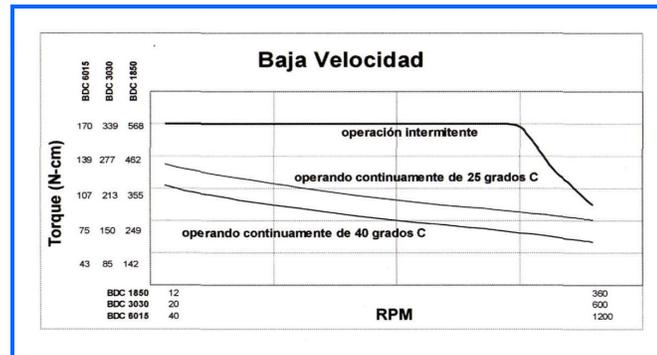


Figura 57. Gráfica de Torque vs rpm- Rango de baja velocidad. Tomada del Catálogo Caframo.

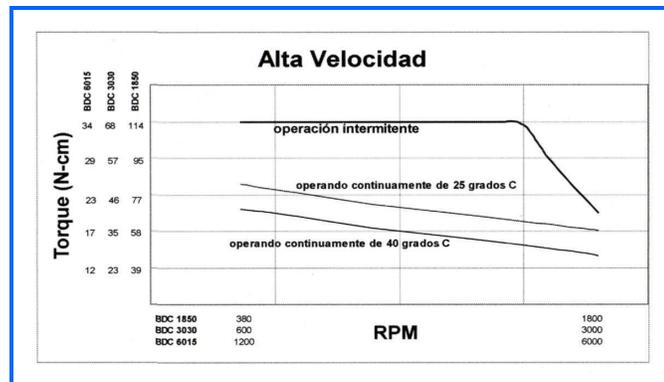


Figura 58. Gráfica de Torque vs rpm- Rango de alta velocidad. Tomada del Catálogo Caframo.

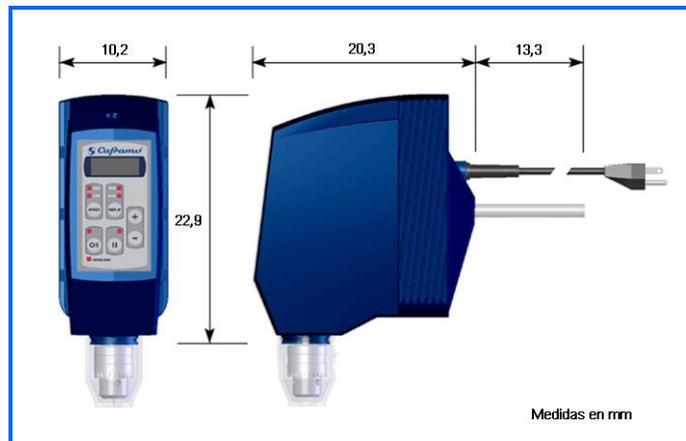


Figura 59. **Dimensiones del motor.** Tomada del Catálogo Caframo. Modificaciones de los autores.

### *Líneas y válvulas*

Las líneas son las tuberías mediante las cuales se trasladará el gas desde el cilindro o la bombona hasta el recipiente a presión. Dado que el sistema va a trabajar con presiones inferiores a 5.000 psi se escogieron líneas de baja presión.

Las válvulas seleccionadas son Whitey de cierre rápido SS 4152 y presión máxima de trabajo de 2.500 psi @ 100°F (17 MPa @ 38°C). También se escogió una válvula micrométrica Whitey SS 22RS4, con presión máxima de trabajo de 3.000 psi; para la regulación del caudal de gas que se inyectará en el recipiente.

### *Tuercas y arandelas de presión*

Para la sujeción de las tapas a la barras soporte se seleccionaron tuercas de hierro galvanizado 3/8-16 UNC, grado 2. Por seguridad y para evitar ralladuras a causa del contacto directo entre las tuercas y las tapas se colocaron arandelas de seguridad de 3/8 in.

### *Dimensionamiento*

Una vez que seleccionados los materiales y escogidos los equipos y accesorios necesarios, se procedió a realizar el dimensionamiento de los diferentes componentes del recipiente a presión.

En el dimensionamiento del recipiente se debe tener en cuenta la entrada del gas que va a presurizar al sistema, la entrada del filtro mediante el cual se va a inyectar el gas y una salida que va a permitir purgar el sistema al comienzo de cada ensayo o liberar presión, a la hora de que la misma suba por encima del valor fijado como máximo. En la Figura 60 se presenta un bosquejo de lo que se va a dimensionar.

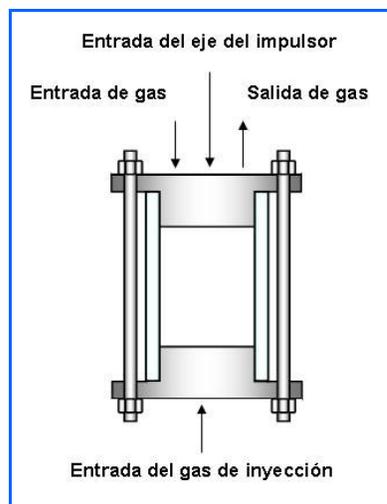


Figura 60. Esquema del Recipiente a Presión.

Las tapas se van a dimensionar a partir de una plancha de acero inoxidable de 30 mm de espesor. Para el dimensionamiento de la celda se realizó una selección a partir de los tubos de acrílico disponibles en el Taller Mecánico de PDVSA Intevep, en la Tabla 18 se muestran las dimensiones de estos tubos.

Tabla 18. Dimensiones de tubos de acrílico.

Nº	Diámetro interno [mm]	Diámetro externo [mm]	Grosor [mm]
1	75	89	7
2	61	70	4,5
3	59	69	5
4	90	102	6
5	71	80	4,5
6	50	59	4,5
7	78	95	9,7

El tubo seleccionado fue el número 4, ya que por requisito el diámetro de la celda tiene que estar contenido entre 90 y 100 mm, y este tubo es el único que cumple con dicha condición. Con esta elección ya se tiene fijado el diámetro exterior e interior de la celda, por lo que se procede a establecer la altura. La longitud total de la celda se puede desglosar de la siguiente forma (ver Figura 61).

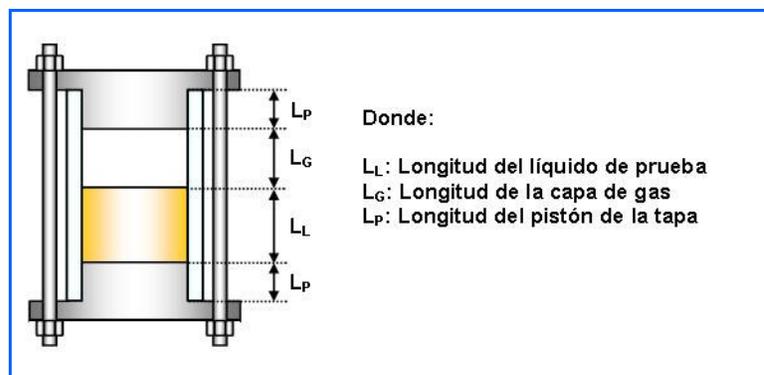


Figura 61. Descomposición de la longitud total de la celda.

En base a la Figura 61 la longitud total de la celda viene dada por:

$$L_C = L_L + L_G + 2 \times L_P$$

El volumen se define como:  $V = \frac{\pi \times D^2 \times L}{4}$

Despejando la longitud se tiene:  $L = \frac{V \times 4}{\pi \times D^2}$

Se calcula la longitud del líquido ( $L_L$ ), para un diámetro de 90 mm y un volumen de 600 cc.

$$L_L = \frac{600 \text{ cc} \times 4}{\pi \times \left(\frac{90}{100}\right)^2 \text{ cm}^2} = 9,64 \text{ cm} \approx 100 \text{ mm}$$

De forma análoga, se calcula la longitud de la capa de gas ( $L_G$ ) para un diámetro de 89 mm y un volumen de 300 cc; este volumen se escogió en función de poder ampliar el volumen de muestra de líquido en caso de que se requiriese:

$$L_G = 4,82cm \approx 50mm$$

La longitud del pistón de la tapa ( $L_p$ ) se fijó en 15 mm teniendo en cuenta que el espesor de total de la tapa ( $E_t$ ) es de 30 mm y el alojamiento de los O-Rings.

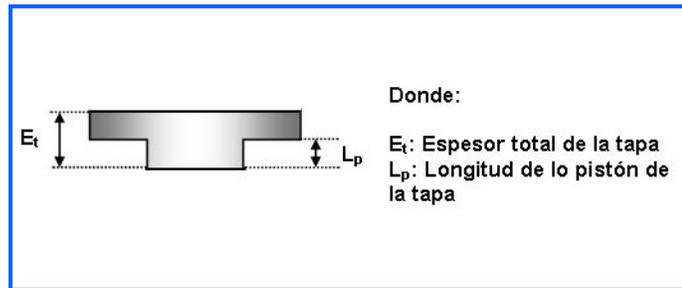
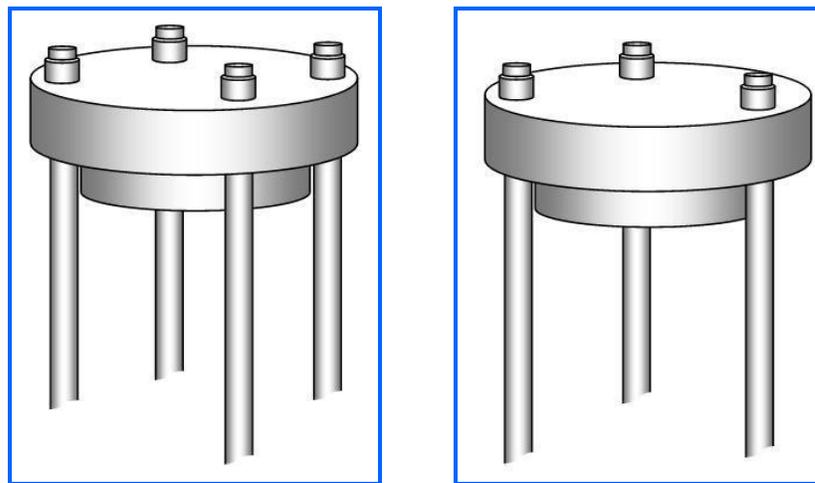


Figura 62. Tapa del recipiente a presión.

Por lo tanto, la longitud total de la celda:

$$L_C = (100 + 50 + 2 \times 15)mm = 180mm$$

Se decidió colocar tres barras soporte, en vez de cuatro, alrededor de la celda por cuestiones de estabilidad del recipiente.



(a)

(b)

Figura 63. Barras Soporte: (a) Cuatro barras soporte y (b) Tres barra soporte.

En la Figura 64 se muestra una vista superior de la disposición de las barras soporte. Éstas están distribuidas uniformemente alrededor de una circunferencia

concéntrica a la celda de radio  $r_{ext C}$  y equidistanciados entre ellas a una distancia  $D_B$ . Esta distancia debe ser mayor que el diámetro exterior de la celda ( $2r_{ext C}$ ) para no interferir con la sección de visualización:

$$D_B > 2r_{ext C}$$

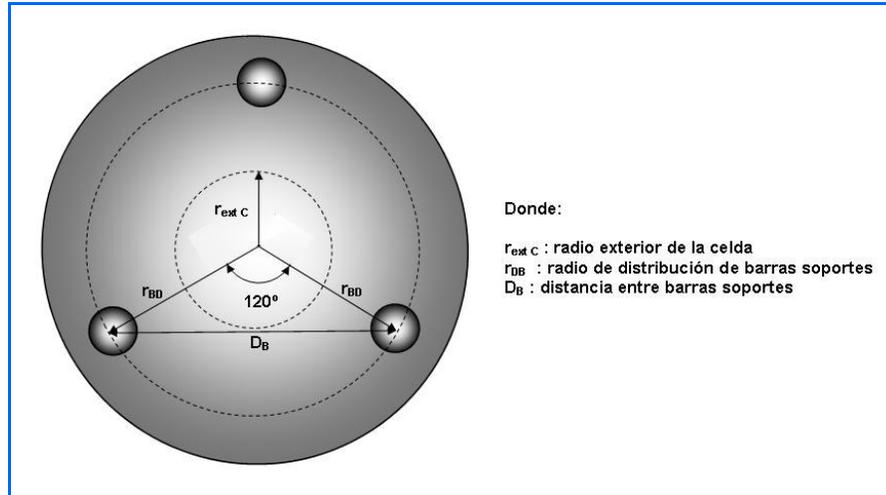


Figura 64. Diagrama de disposición de tubos soportes.

Por relaciones geométricas se obtiene que  $r_{ec}$  es igual a:

$$r_{DB} = \frac{D_B/2}{\text{sen}60^\circ}$$

Se calcula el radio mínimo al cual se deberían encontrar las barras soportes desde el centro de la celda, suponiendo que  $D_B=2r_{ext C}$ , donde  $r_{ext C}$  es 51 mm.

$$r_{DB \text{ min}} = \frac{51 \times 2/2}{\text{sen} 60^\circ} = 58,89 \text{ mm} \approx 60 \text{ mm}$$

En base a este radio mínimo, se fijó la distancia a la cual se encontraría distribuidos las barras soporte del centro en 75 mm.

Para evitar daños en la celda la tapa superior se apoyará en las barras soporte. Por este motivo, las barras soporte va a tener una variación de sección en los extremos y la longitud de la sección de mayor diámetro va a ser ligeramente mayor a la altura de la celda (ver Figura 65).

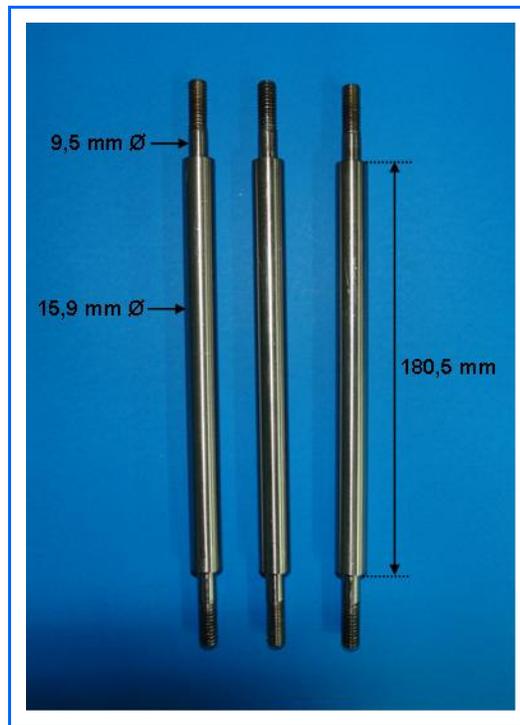


Figura 65. Barras soporte.

El diámetro de la menor sección es de 3/8 in (9,5 mm) y se le realizó una rosca de 16 UNC; la longitud de ésta sección es de 35 mm y se escogió teniendo en cuenta que el espesor de las tapas fijado anteriormente. La mayor sección se escogió de un diámetro de 5/8 in (15,9 mm) y una longitud de 180,5 mm.

El filtro debe poder retirarse al finalizar cada prueba para mantenimiento, por lo cual se diseñó un mecanismo que permita acoplar y desacoplar el filtro a la tapa (ver Figura 66). Adicionalmente, al filtro se le soldó una placa de acero inoxidable 316 para que ésta sirviera de soporte para el alojamiento de los Oring (ver Figura 66).

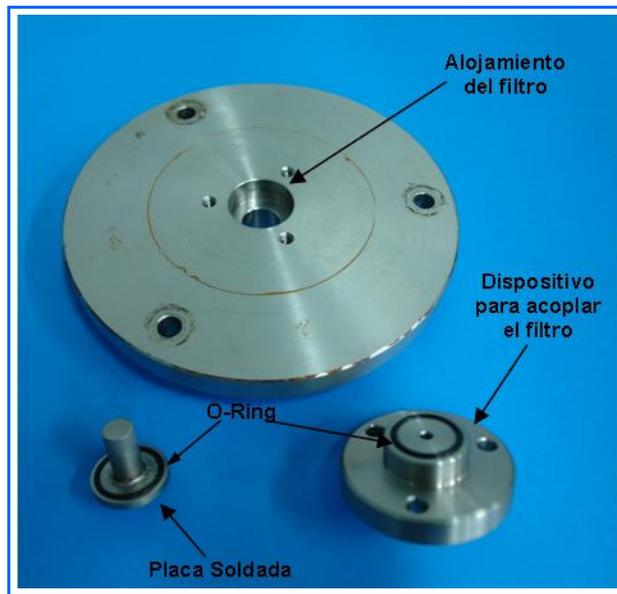


Figura 66. Tapa inferior.

La selección de los tamaños de los sellos y el dimensionamiento de los alojamientos quedó a cargo del Taller Mecánico de PDVSA Intevep. El diseño del alojamiento para la estopera se realizó una vez definido el diámetro del eje del agitador (ver Figura 67).



Figura 67. Tapa superior.

En la Figura 68 se muestra el recipiente a presión armado; en el apéndice C se presentan del mismo.



Figura 68. Recipiente a presión.

#### 3.3.4.5. Diseño de Detalles y Verificación de Aspectos Técnicos

Después de diseñar el recipiente a presión surge la necesidad de diseñar otros componentes y de verificar aspectos técnicos del recipiente a presión.

##### ***Base o soporte del recipiente***

Se requiere un soporte que sirva de base para el recipiente a presión descrito anteriormente. La base se diseñó con un apoyo de tres por cuestiones de estabilidad y para no interferir con la sección de visualización de la celda, el material seleccionado fue hierro (ver Figura 69 ). En el apéndice C se muestran los planos de este soporte.

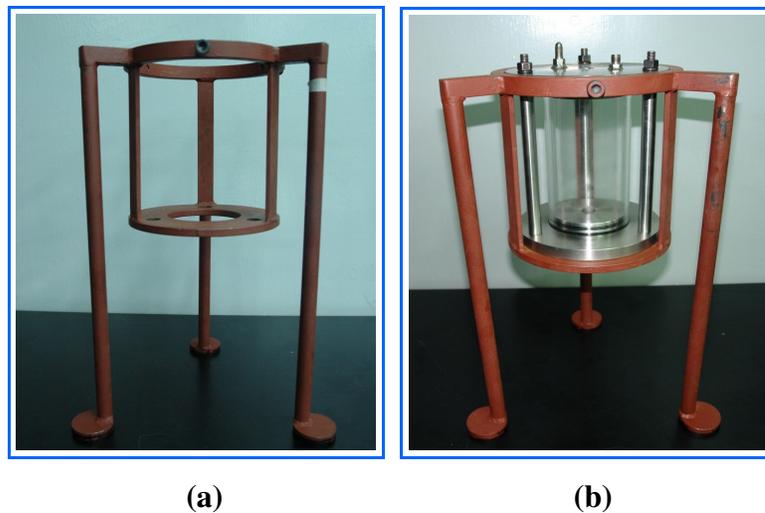


Figura 69. Soporte del recipiente a presión: (a) Vista frontal del soporte y (b) Montaje del recipiente a presión en la base.

***Recipiente antidistorsión***

Al revisar diferentes bibliografías relativas a ensayos de agitación, se hace referencia al sumergimiento de la celda en un recipiente transparente de base rectangular lleno de agua o glicerina para evitar la distorsión visual causada por la forma cilíndrica de ésta. Por tal motivo se diseñó un recipiente de base cuadrada en acrílico que cumpla con esta función (ver Figura 70). A este recipiente se le anexo una regla graduada en mm para poder tener una referencia cuantitativa de la escala de los fenómenos que se lleguen visualicen. En el apéndice de planos se muestran los planos de este recipiente.

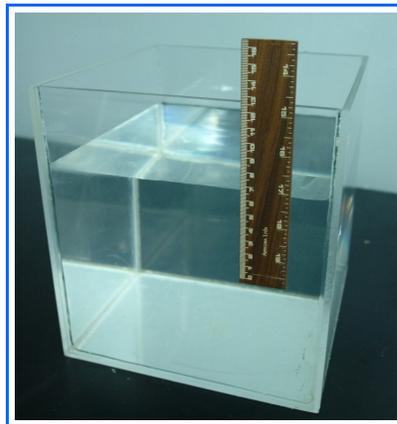


Figura 70. Recipiente antidistorsión.

***Cálculos de presión máxima de la celda***

Para el cálculo de la presión máxima del recipiente se aplica la *Teoría de Recipientes Presión de Pared Delgada*. Donde los esfuerzos vienen dado por:

$$\sigma_c = \frac{d_i P_R}{2t} \quad \sigma_l = \frac{d_i P_R}{4t}$$

Los esfuerzos dependen de la presión, la cual es positiva; y del diámetro y espesor de la celda. Provocando que la celda se encuentra a tensión. Aplicando la *Teoría del esfuerzo normal máximo* se tiene que:

$$\sigma_{\max} = \frac{S_t}{n_d}$$

El material a utilizar es quebradizo (polimetacrilato) por lo que se seleccionó un factor de seguridad de 3, tal como se explica en la sección 2.7. Se calcula el esfuerzo máximo a la cual puede ser sometida la celda sabiendo que la resistencia a la tracción (St) del acrílico es de 34/000 KPa:

$$\sigma_{\max} = \frac{34.000 \text{ KPa}}{3} = 11.333 \text{ KPa}$$

Como el esfuerzo circunferencial es mucho mayor (el doble) que el esfuerzo longitudinal, se supone que el esfuerzo máximo es igual al esfuerzo circunferencial y de esta forma se despeja la presión máxima:

$$\sigma_c = \sigma_{\max} = 11.333 \text{ KPa}$$

$$\sigma_c = \frac{d_i P_R}{2t} \Rightarrow P_R = \frac{2\sigma_c t}{d_i}$$

donde  $d = 90 \text{ mm}$  y  $t = 6 \text{ mm}$

$$P_R = \frac{2\sigma_c t}{d_i} = \frac{2 \times 11.333 \text{ KPa} \times 6 \text{ mm}}{90 \text{ mm}} = 1.511,11 \text{ KPa} (219,17 \text{ psi})$$

El resultado obtenido conlleva a que la presión de trabajo no debe superar el valor de 1.511,11 KPa (219,17 psi), para evitar daños en la estructura de la celda. Sin embargo, por sugerencia del Taller Mecánico la presión de trabajo no va a exceder los 80 psi (551,58 KPa), provocando que el diseño quede sobredimensionado, teniendo un factor de seguridad de 8.

### ***Cálculo de esfuerzos***

Las tapas y barras soporte se encuentran sometidas a esfuerzos debido a la presión del sistema. Por lo cual, a cada una de estas piezas se les realizó un análisis de las fuerzas que actúan sobre ellas, y de esta forma determinar si pueden soportar la carga con seguridad.

Tapa

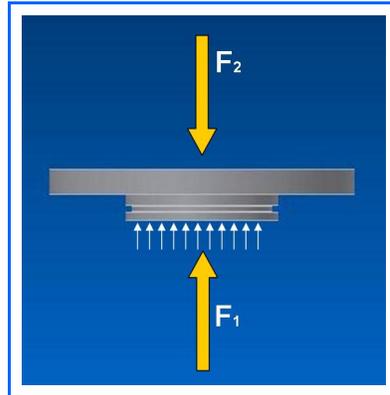


Figura 71. Diagrama de cuerpo libre de la tapa.

Se sabe que  $F_1 = \sigma_1 \times A_1$  y  $F_2 = \sigma_2 \times A_2$

Suponiendo que la tapa carece de peso, para mantener el sistema en equilibrio se necesita otra fuerza ( $F_2$ ) de igual magnitud y sentido contrario a  $F_1$ :

$$\sum F = 0$$

$$F_1 = F_2$$

Por lo cual:

$$\sigma_1 \times A_1 = \sigma_2 \times A_2$$

Despejando el esfuerzo ( $\sigma_2$ ), se tiene que:

$$\sigma_2 = \frac{P_R \times A_1}{A_2}$$

donde:

$P_R$  = presión máxima de trabajo (551,58 KPa)

$A_1$  = área de la tapa que está en contacto con los fluidos.

$A_2$  = sumatoria del área de las tuercas.

$$\sigma_2 = \frac{551,58 \text{ KPa} \times \frac{\pi \times (90 \text{ mm})^2}{4}}{\frac{\pi \times 3 \times [(12,7 \text{ mm})^2 - (9,525 \text{ mm})^2]}{4}} = 21.105,06 \text{ KPa}$$

Como el estado de esfuerzo es uniaxial y la estructura se encuentra a compresión, el mayor de los esfuerzos ( $\sigma_2$ ) se compara directamente con la resistencia a la compresión del material, teniéndose que:

$$n_d = \frac{S_c}{\sigma_2}$$

donde  $S_c$  para el acero inoxidable 316 es 170 MPa:

$$n_d = \frac{170.000 \text{ KPa}}{21.105,06 \text{ KPa}} = 8,05 \approx 8$$

*Barras soporte*

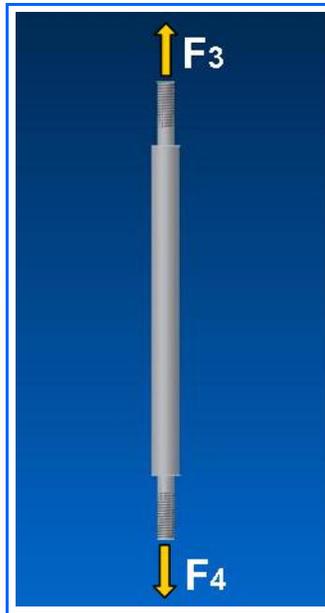


Figura 72. Diagrama de cuerpo libre de las barras soporte.

Para que se encuentre en equilibrio:

$$\sum F = 0$$

$$F_3 = F_4$$

Se sabe que:  $F_3 = \sigma_3 \times A_3$  y  $F_4 = \sigma_4 \times A_4$

Por lo que:

$$\sigma_3 \times A_3 = \sigma_4 \times A_4$$

Como  $A_4$  es igual  $A_3$  se tiene que:

$$\sigma_3 = \sigma_4$$

Por equilibrio del sistema total:

$$F_2 = 3F_3$$

$$F_3 = \frac{F_2}{3} = \frac{P_R \times A_1}{3}$$

Se sabe que  $F_3 = \sigma_3 \times A_3$ , por lo que se tiene que:

$$\frac{P_R \times A_1}{3} = \sigma_3 \times A_3$$

Despejando el esfuerzo de la barra:

$$\sigma_3 = \frac{P_R \times A_1}{3 \times A_3}$$

donde:

$P_R = 551,58$  KPa

$A_1$  = área de la tapa que está en contacto con los fluidos.

$A_3$  = sumatoria del área. Es el área de la menor sección transversal de las barras soporte.

$$\sigma_3 = \frac{551,58 \text{ KPa} \times \frac{\pi \times (90 \text{ mm})^2}{4}}{3 \times \frac{\pi \times (9.525 \text{ mm})^2}{4}} = 16.415,05 \text{ KPa}$$

Como ya se explicó anteriormente el estado de esfuerzo es uniaxial por lo que se compara el mayor de los esfuerzos ( $\sigma_3$ ) directamente con la resistencia, en este caso la estructura se encuentra a tensión por lo que se compara con la resistencia a la tracción, teniendo en cuenta que:

$$n_d = \frac{S_t}{\sigma_2}$$

Donde  $S_t$  para el acero inoxidable 316 es 525 MPa:

$$n_d = \frac{525.000 \text{ KPa}}{16.415,05 \text{ KPa}} = 31,98 \approx 32$$

#### ***Prueba de presión hidrostática***

Luego de construido el recipiente a presión se verifica que no presente fugas y que soporte una presión de 80 psi (551,58 KPa), para esto se aplicó una prueba hidrostática. El equipo utilizado es el Hydrostatic Test Stand Model P300.

Al realizar la prueba el recipiente presentó fuga por los topes, por lo cual se rediseñó el sistema de sellado. La causa de esta fuga es que el tubo de acrílico presenta ciertas deformaciones que causan una mala distribución del O-Ring entre el pistón de la tapa y la celda, por este motivo se le agregó un O-Ring en el punto de contacto del tope de la celda con la tapa (ver Figura 73).

Luego de rediseñar el sellado, se le volvió a realizar al recipiente una prueba hidrostática, en la cual no presentó fugas y soportó la presión de 80 psi.

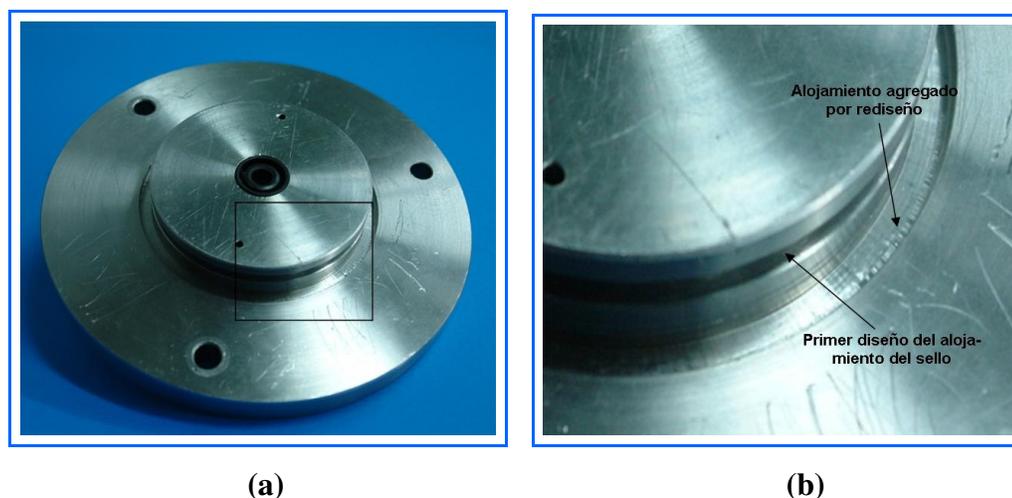


Figura 73. Rediseño del sellado: (a) Tapa superior y (b) Detalle de los alojamientos.

#### 3.3.4.6. Toma de Datos del Banco de Pruebas

Los datos a tomar durante la realización de las pruebas son: (a) la presión del sistema; (b) el torque del eje del impulsor y (c) el tiempo de ascenso de burbujas.

Para la adquisición de estos parámetros originalmente se propuso: medir la presión del sistema a través de un manómetro instalado en la tapa superior, registrar el valor del torque del eje del impulsor a través de la lectura en la pantalla del motor y contabilizar el tiempo de ascenso de burbujas mediante un cronómetro digital.

Con la finalidad de tener un registro digital de estos datos se ideó un proyecto para automatizar la adquisición de los mismos, esto parte estuvo a cargo de la Gerencia de Automatización Informática y Telecomunicaciones de PDVSA Intevep (AIT). Para ello se empleó el software LabVIEW 4.1, el cual proporciona un entorno de desarrollo gráfico para el diseño de diferentes aplicaciones, entre ellas la cuales destaca la adquisición y presentación de datos.

La primera fase llevada a cabo para la automatización de los datos fue el registro de la presión del sistema y del tiempo de ascenso de burbujas. Para ello se reemplazó el manómetro por un transductor de presión y adjuntamente se colocó una alarma que se activa cuando la presión supera el valor dado como máximo; se instalaron cuatro cronómetros digitales, los mismos se pueden accionar en conjunto o no, y se

desactivan por separados, lo cual permite la toma de diferentes tiempos. Todos los datos adquiridos son registrados en una hoja de cálculo de Excel. En la Figura 74 se muestra el panel de control del programa; allí se pueden distinguir tres sectores: el sector A, donde está ubicada la alarma de presión; el sector B, donde se encuentran los cuatro cronómetros, éstos se accionan simultáneamente y se detienen independientemente; y el sector C donde se lee el valor de la presión. Las fases subsiguientes para la automatización de los datos están en proceso.

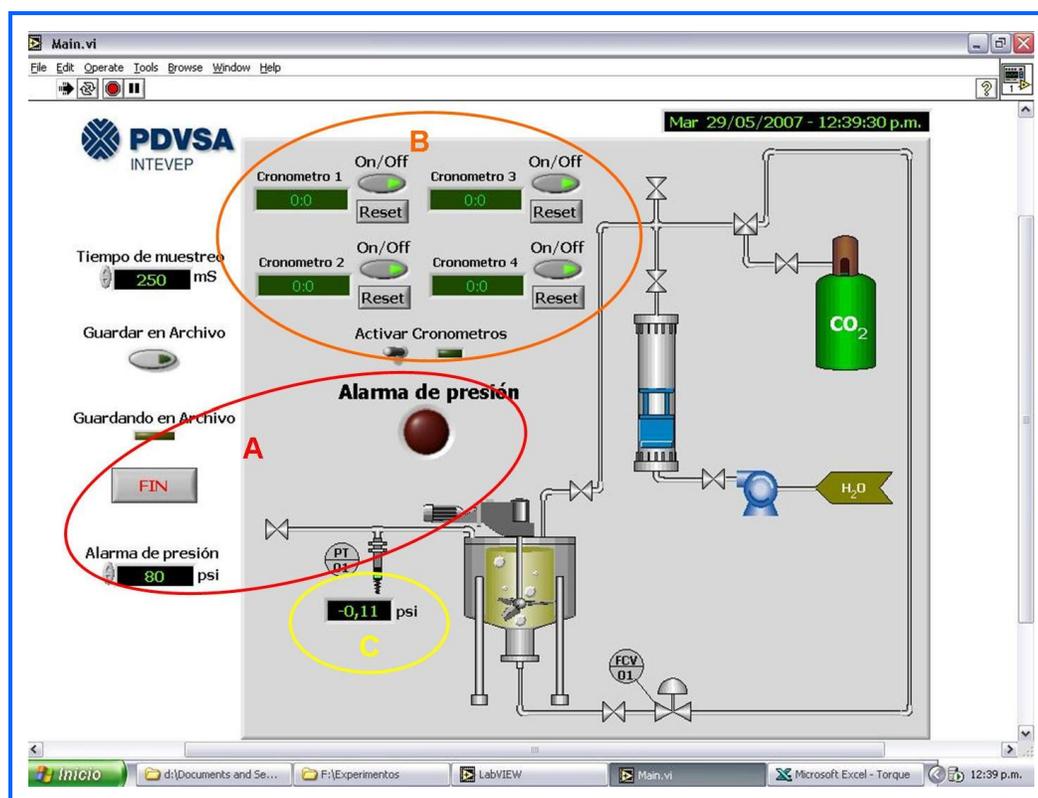


Figura 74. Panel de control de la presentación y toma de datos.

Adicionalmente se diseñó un formato en una hoja de cálculo de Excel para llevar el registro del torque a intervalos de 1 minuto; y se colocó una cámara de video para grabar parte del desarrollo de las pruebas.

## 3.3.4.7. Banco de Pruebas

Una vez seleccionados o contruidos los componentes del Banco de Pruebas, se procedió al ensamblaje del mismo. En la Figura 75 se presenta el esquema de la instalación del Banco de Pruebas y en la Figura 76 se presenta el Banco de Pruebas.

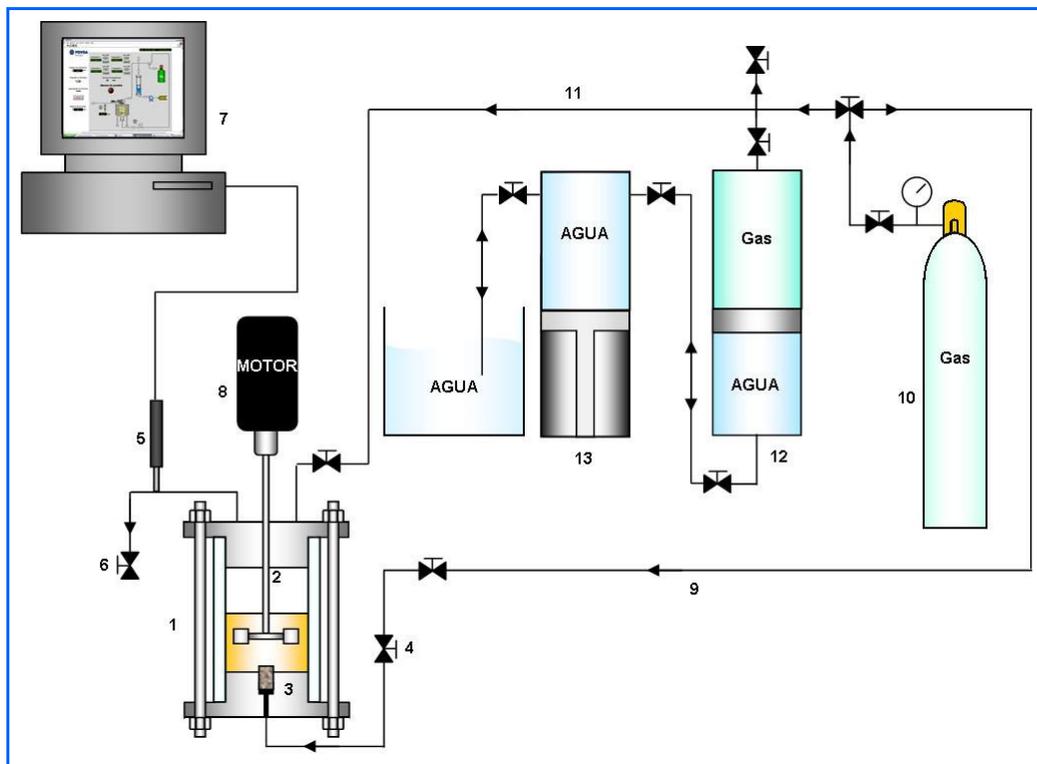


Figura 75. Esquema de la instalación del Banco de Pruebas.

El Banco de Pruebas consta de los siguientes elementos:

1. Recipiente a presión
2. Impulsor
3. Filtro
4. Válvula micrométrica
5. Transductor de presión
6. Válvula de alivio
7. Computador
8. Motor

9. Línea de gas de inyección
10. Bombona de gas
11. Línea de gas de presurización
12. Cilindro tipo pistón
13. Bomba de desplazamiento positivo

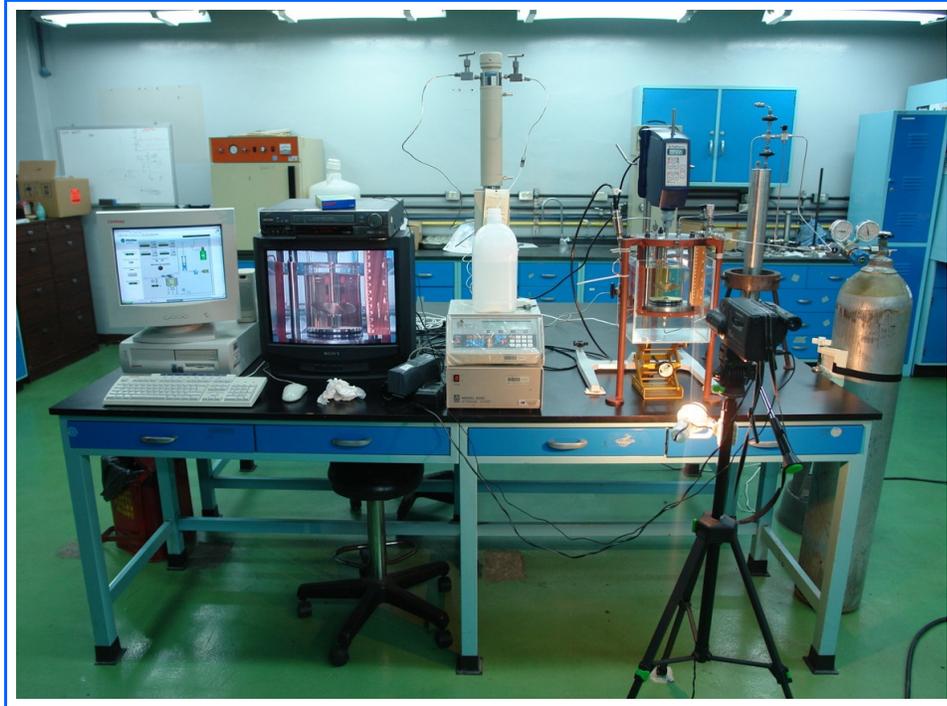


Figura 76. **Banco de Pruebas.**

Además de los componentes mencionados anteriormente, el Banco de Pruebas cuenta, tal como se explicó en la sección anterior, con una cámara de video conectada a un televisor.

El Banco de Pruebas diseñado no sólo permite la realización de la metodología experimental planteada en el Trabajo Especial de Grado, sino que permite representar diversas operaciones de agitación a escala de laboratorio. Las principales características del banco son: (a) total visualización del proceso de agitación y registro del mismo; (b) regulación de la presión del sistema, teniendo como presión máxima 70 psi; (c) volumen total de la celda de 1.000 cc; (d) variación de la

velocidad angular en un rango de 40-6.000rpm y (e) medición digital de la velocidad angular, el torque, la presión y el tiempo.

En la Figura 77 se aprecia en detalle el montaje del recipiente a presión en el Banco de Pruebas.

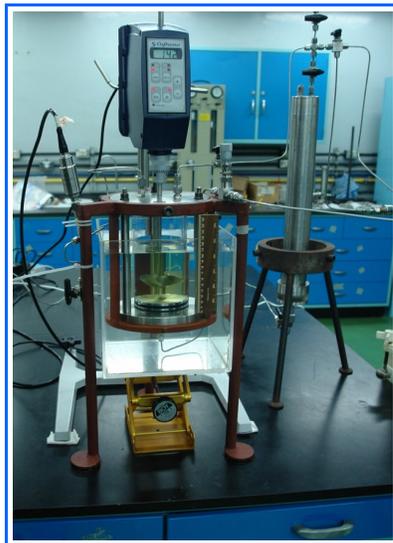


Figura 77. Montaje del recipiente a presión.

A continuación se presenta los pasos a seguir para la manipulación del Banco de Pruebas:

1. Insertar el impulsor de prueba en la tapa superior.
2. Verter el líquido de prueba en el recipiente a presión y cerrar el mismo.
3. Acoplar el motor al eje del impulsor de prueba.
4. Presurizar el recipiente a la presión de trabajo con la bombona (la cual no debe exceder 80 psi).
5. Cerrar el paso del gas de prueba de la bombona al recipiente.
6. Abrir el paso de gas de la bomba al recipiente.
7. Fijar la presión de inyección en la bombona.
8. Regular la válvula micrométrica al caudal de inyección del gas deseado.
9. Abrir el paso de gas de la bombona hasta el filtro y encender el motor.
10. Registrar el tiempo de ascenso de las burbujas.
11. Culminar la prueba al llegar al tiempo máximo.

### 3.4. Dimensionamiento y Construcción de los Impulsores

Luego de tener precisado el diámetro interno del recipiente de pruebas (90 mm), fue posible realizar todo el dimensionamiento de los impulsores y encargar su construcción. Esta fase de trabajo comprendió las actividades desarrolladas a continuación. El material escogido para la construcción de los impulsores es el acero inoxidable AISI 316, las propiedades de éste fueron expuestas en el capítulo anterior.

#### 3.4.1. Determinación de las Dimensiones Características

Esta actividad consistió en darle medidas a las relaciones adimensionales de la Tabla 3, para cada modelo de impulsor tipo turbina. Es importante aclarar que en vista de que se consiguió dentro de PDVSA Intevep un impulsor tipo turbina de disco de hojas planas con un diámetro tal que  $W/D = 1/5$  y  $D/T = 0,73$ , valor último que se encuentra dentro del rango para flujo laminar, se decidió aprovechar este impulsor y así ahorrar tiempo en construcción. En la Tabla 19 se presentan las dimensiones características resultantes.

Tabla 19. Dimensiones de los diseños de impulsores tipo turbinas.

Impulsores	Diámetro [D]	Dimensión	Medida [mm]
Turbina de hojas planas	30	N	6
		W	6
		P	90°
	76,5	N	6
		W	15,3
		P	90°
Turbina de disco de hojas planas	30	N	6
		W	6
		P	90°
	65,76	N	6
		W	13,44
		P	90°
Turbina de hojas inclinadas	30	N	6
		W	10
		P	45°
	76,65	N	6
		W	25,5
		P	45°

En cuanto a los impulsores A-310 y A-100, para cada uno se averiguaron los diámetros ofrecidos en el mercado y se encontró uno sólo menor al del recipiente de pruebas. Para el impulsor A-310 el diámetro seleccionado fue 2,5 in (63,5 mm) y para el A-100 fue 3,1 in (78,74 mm). Ambos diámetros implican una relación  $D/T$  en el rango para flujo laminar.

#### 3.4.1.1. Cálculo del Espesor de Hojas del Impulsor

Se calculó el espesor de hoja mediante la ecuación:

$$D_t = \left[ \frac{T_Q 6}{n S W} \left( 1 - \frac{4R_h}{3R} \right) \right]^{1/2}$$

donde:

$T_{Q(\text{máx})}$  = es el toque máximo del motor seleccionado [15 in.lb (170 N.cm)]

$n = 6$

$S = 205$  Mpa por ser el material acero inoxidable 316.

Impulsor tipo turbina de hojas planas ( $D = 30$  mm)

$W = 6$  mm

$R_h = 4,76$  mm

$R = 15$  mm

$$D_t = \left[ \frac{1,7 \text{ N.m} \times 6}{6 \times 205 \times 10^6 \text{ Pa} \times 0,006 \text{ m}} \left( 1 - \frac{4 \times 0,00476 \text{ m}}{3 \times 0,015 \text{ m}} \right) \right]^{1/2} = 8,93 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,893 \text{ mm}$$

De forma análoga se realizan los cálculos con los demás impulsores. En la Tabla 20 se presentan los resultados del espesor de paleta mínimo para cada impulsor y el espesor de paleta seleccionado el cual fue seleccionado con una relación  $D_t/D = 1/30$ .

Tabla 20. Espesor de hojas del impulsor

Impulsor	D [mm]	W [mm]	R <sub>h</sub> [mm]	R [mm]	D <sub>t</sub> [mm]	D <sub>t real</sub> [mm]
<b>Turbina de disco de hojas planas</b>	30	6	4,76	15	0,893	<b>1,5</b>
<b>Turbina de hojas planas</b>	30	6	4	15	0,944	<b>0,9</b>
	76,5	15,3	7	38,3	0,640	<b>2,3</b>
<b>Turbina de hojas inclinadas</b>	30	7,1	4	15	0,869	<b>1</b>
	76,65	14,9	7,8	38,3	0,638	<b>2,55</b>

En la Figura 78, Figura 79 y Figura 80 se muestran los impulsores construidos.



Figura 78. Impulsor tipo turbina de hojas planas ( $D/T = 0,85$ ).

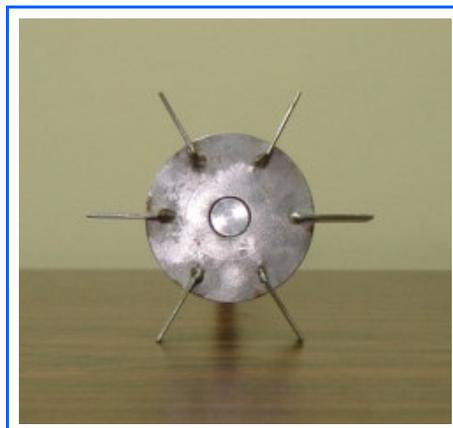


Figura 79. Impulsor tipo turbina de disco de hojas planas ( $D/T = 0,85$ ).



Figura 80. Impulsor tipo turbina de hojas inclinadas (D/T =0,85).

#### 3.4.1.2. Determinación del Diámetro del Eje del Impulsor

El cálculo del diámetro del eje se realizó según la teoría expuesta en la sección 2.3.11.1.

$$d_s = \left[ \frac{16 \sqrt{(T_{Q(\max)})^2 + (M_{\max})^2}}{\pi \sigma_s} \right]^{1/3} \quad d_t = \left\{ \frac{16 \left[ M_{\max} + \sqrt{(T_{Q(\max)})^2 + (M_{\max})^2} \right]}{\pi \sigma_t} \right\}^{1/3}$$

Donde el momento flector máximo viene dado por:

$$M_{\max} = \Sigma(19.000 H_{pt} L' / ND)$$

La potencia ( $H_{pt}$ ), el torque ( $T_{Q(\max)}$ ) y la velocidad angular ( $N$ ) vendrán dados por las condiciones máximas de operación del motor seleccionado. Teniendo que:

$$H_{pt} = 0,20 \text{ hp}$$

$$\text{Rango de Baja velocidad: } N = 1.168 \text{ rpm} \quad T_{Q(\max)} = 15 \text{ in.lb (170 N.cm)}$$

$$\text{Rango de Alta velocidad: } N = 6.000 \text{ rpm} \quad T_{Q(\max)} = 3 \text{ in.lb (34 N.cm)}$$

La distancia del impulsor al primer apoyo se supuso en 300 mm, para ello se tomó en cuenta las dimensiones del recipiente a presión y el hecho de que el impulsor se encontrará a una relación  $C/Z = 1/3$ . Como el material es acero inoxidable 316, el

esfuerzo límite de corte se tomó de 6.000 psi y el de tensión de 10.000 psi (Ramsey y Zoller, 1976).

Como los diámetros de los impulsores son directamente proporcionales al momento flector y éste es inversamente proporcional al diámetro del impulsor, basta con calcular el diámetro del eje para el menor diámetro de impulsor, que sería el  $D = 30$  mm. Teniendo que:

Baja Velocidad

$$M_{\max} = \frac{19.000 \times 0,2 \text{ hp} \times 300 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ in}}{25,4 \text{ mm}}}{1.168 \text{ rpm} \times 30 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ in}}{25,4 \text{ mm}}} = 32,53 \text{ in.lb}$$

$$d_s = \left[ \frac{16 \sqrt{(15 \text{ in.lb})^2 + (32,53 \text{ in.lb})^2}}{\pi \times 6.000 \text{ psi}} \right]^{\frac{1}{3}} = 0,31 \text{ in (7,98 mm)}$$

$$d_t = \left\{ \frac{16 \left[ 32,53 \text{ in.lb} + \sqrt{(15 \text{ in.lb})^2 + (32,53 \text{ in.lb})^2} \right]}{\pi \times 10.000 \text{ psi}} \right\}^{\frac{1}{3}} = 0,33 \text{ in (8,34 mm)}$$

Alta Velocidad

$$M_{\max} = \frac{19.000 \times 0,2 \text{ hp} \times 300 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ in}}{25,4 \text{ mm}}}{6.000 \text{ rpm} \times 30 \text{ mm} \times \frac{1 \text{ in}}{25,4 \text{ mm}}} = 6,33 \text{ in.lb}$$

$$d_s = \left[ \frac{16 \sqrt{(3 \text{ in.lb})^2 + (6,33 \text{ in.lb})^2}}{\pi \times 6.000 \text{ psi}} \right]^{\frac{1}{3}} = 0,18 \text{ in (4,63 mm)}$$

$$d_t = \left\{ \frac{16 \left[ 6,33 \text{ in.lb} + \sqrt{(3 \text{ in.lb})^2 + (6,33 \text{ in.lb})^2} \right]}{\pi \times 10.000 \text{ psi}} \right\}^{\frac{1}{3}} = 0,19 \text{ in (4,84 mm)}$$

El diámetro mínimo del eje del impulsor es 8,34 mm. Teniendo en cuenta este diámetro y que los impulsores de alto rendimiento tienen un diámetro de eje de 3/8 in (9,525 mm), se seleccionó éste como el diámetro de eje de los impulsores tipo turbina; lo cual permitió seleccionar un único modelo y tamaño de estopera.

Estas dimensiones permitieron hacer el diseño de forma y detalles para cada turbina. Se mandaron a construir las turbinas, el impulsor y se soldaron. En el apéndice de planos se presenta los planos de estos diseños. En la Figura 81 se presentan los impulsores y sus ejes construidos.

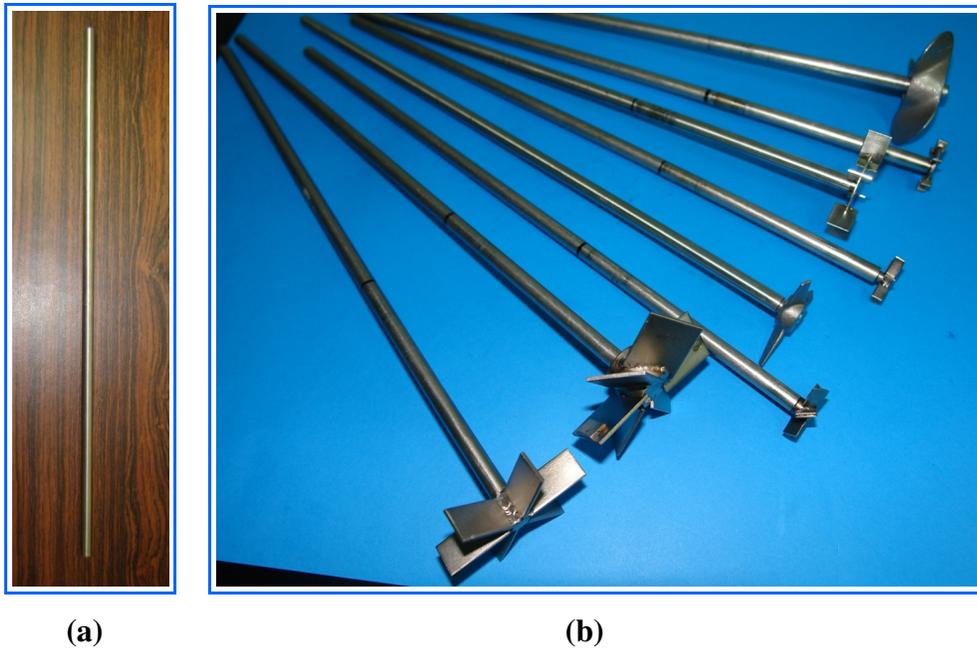


Figura 81. Turbinas construidas: (a) Eje de los impulsores y (b) Prototipos de impulsores tipo turbinas.

### 3.4.2. Balaceo Dinámico

Para evitar desbalances dinámicos que ocasionan desgaste de los sellos, vibraciones en el Banco de Prueba y daño en los rodamientos del motor los impulsores fueron balanceados dinámicamente. Este balanceo fue realizado a través de una máquina de balanceo portátil SCHENK *Vibrobalancer* 41.

### 3.5. Metodología Experimental para la Evaluación de los Impulsores

La teoría experimental de la agitación se basa en un tratamiento adimensional de las variables, por lo cual, la metodología a seguir en la evaluación de las capacidades de los impulsores para acelerar el ascenso del gas a través de líquidos viscosos, se enfocó en el parámetro adimensional Número de Reynolds.

La metodología se dividió en dos fases, la primera fase (Fase A) evalúa la influencia de la relación  $D/T$ , y la segunda fase (Fase B) evalúa la influencia de los diferentes modelos de impulsores.

En la evaluación de la relación  $D/T$  (Fase A) se establece un régimen de flujo mediante la fijación de un Número de Reynolds y se evalúan los tres modelos básicos de impulsores tipo turbina seleccionados anteriormente (turbina de hojas planas, turbina de disco de hojas planas y turbina de hojas inclinadas) para las relaciones  $D/T = 1/3$  y  $D/T = 0,85$ . En base a los resultados arrojados por esta fase se selecciona la relación  $D/T$  que funciona mejor para cada modelo.

En la evaluación de modelos de impulsores (Fase B) se establecen dos regímenes de flujo (fijando dos Número de Reynolds) y para cada régimen se evalúa el desempeño de los impulsores: turbina de hojas planas, turbina de disco de hojas planas, turbina de hojas inclinadas, impulsor de alto rendimiento A-310 e impulsor de alto rendimiento A-100. Los tres modelos de impulsores tipo turbina serán evaluados en la relación  $D/T$ , que la Fase A haya arrojado como más favorecedora.

Otro factor que se tuvo en cuenta es la dirección de la descarga que tienen los impulsores axiales; por lo tanto, los impulsores tipo turbina de hojas inclinadas y los de alto rendimiento serán probados en ambos sentidos de giro y se consideraran como modelos independientes. Por practicidad, se empleará una nomenclatura para designar a los impulsores, la cual se presenta en la Tabla 21.

Tabla 21. Nomenclatura de Impulsores.

Impulsor	Sentido de giro	D/T	Nomenclatura
Turbina de hojas planas	-	1/3	HP 1
Turbina de hojas planas	-	0,85	HP 2
Turbina de disco de hojas planas	-	1/3	DHP 1
Turbina de disco de hojas planas	-	0,85	DHP 2
Turbina de hojas inclinada	horario	1/3	HI 1-H
Turbina de hojas inclinada	horario	0,85	HI 2-H
Turbina de hojas inclinada	antihorario	1/3	HI 1-AH
Turbina de hojas inclinada	antihorario	0,85	HI 2-AH
Alto rendimiento A-310	horario	-	A-310-H
Alto rendimiento A-310	antihorario	-	A-310-AH
Alto rendimiento A-100	horario	-	A-100-H
Alto rendimiento A-100	antihorario	-	A-100-AH

Para la selección de los Números de Reynolds a usar en las Fases A y B se realizaron una serie de cálculos, en los cuales se determinan las velocidades angulares de los diferentes impulsores para un rango de Número de Reynolds de 0 a 20, siguiendo el procedimiento utilizado en la sección 3.3.3.4. Estos cálculos se muestran en las Tablas A-4, A-5 y A-6, del Apéndice A.

En los cálculos obtenidos se observa que el impulsor tipo turbina de paletas inclinadas, con  $D/T = 0,85$  (HI 2), en el fluido de 500 cP, para Número de Reynolds menor a 7 ( $N_{Re} < 7$ ) implica una velocidad angular menor a la permitida por el motor (40-6.000 rpm) y los impulsores tipo turbinas de hojas planas y hojas inclinadas en la relación  $D/T = 1/3$  (HP 1 y HI 1), en el fluido de 6.000 cP, para un Número de Reynolds mayor a 15 ( $N_{Re} > 15$ ) implican velocidades angulares mayores a las ofrecida por el motor. Por lo cual el Número de Reynolds a escoger se limita a un rango de 7-15.

Se escogió Número de Reynolds 7 ( $N_{Re}=7$ ) para la de evaluación de la relación  $D/T$  (Fase A) y para la evaluación de los modelos de impulsores (Fase B) Números de Reynolds 7 y 14 ( $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ ). En la Tabla 22 se presentan los valores de velocidad angular correspondientes.

Tabla 22. Velocidad angulares manejadas en Fases A y Fases B.

Fluido	D [m]	DHP		HP		HI		A-310	A-100
	$N_{Re}$	N [rp.m]	N [rpm]						
500 cP	7	221	56	268	47	268	41	60	39
	14	442	112	535	94	535	82	119	78
3.000 cP	7	1.313	333	1.589	280	1.589	244	355	233
	14	2.627	667	3.178	560	3.178	489	709	467
6.000 cP	7	2.180	553	2.638	464	2.638	406	589	387
	14	4.361	1.107	5.276	929	5.276	811	1.178	775

Establecidas las variables, se calcula el número total de pruebas experimentales. En la Tabla 23 y Tabla 24 su muestra la matriz de los parámetros evaluados para cada impulsor en la fase de evaluación de la relación  $D/T$  (Fase A) y en la fase de evaluación de los modelos de impulsores (Fase B).

Tabla 23. Matriz de experimento para la Fase A

Impulsor	D/T	Sentido de giro	Líquidos	N	Experimentos
HP	2	1	3	1	6
DHP	2	1	3	1	6
HI	2	2	3	1	12
					24

Tabla 24. Matriz de experimentos para la Fase B

Impulsor	D/T	Sentido de giro	Líquidos	N	Experimentos
HP	1	1	3	1 <sup>a</sup>	3
DHP	1	1	3	1 <sup>a</sup>	3
HI	1	2	3	1 <sup>a</sup>	6
A-310	1	2	3	2	12
A-100	1	2	3	2	12
					36

<sup>a</sup> Estos impulsores son los preseleccionados en la Fase A, por lo cual en la misma ya ha sido evaluados para  $N_{Re}=7$  ya sólo se falta evaluarlos valuados a  $N_{Re}=7$  y solo les faltaría para  $N_{Re}=14$ .

Para disminuir errores en mediciones y la influencia de variables extrañas, cada experimento será realizado 2 veces. Por lo tanto el número total de pruebas experimentales es 120.

Los conocimientos adquiridos hasta este punto de la investigación has permitido identificar ciertos rasgos propios de la agitación que afectan al sistema agitado:

- Tamaño de burbujas: entiéndase éste como el tamaño de las burbujas a la salida del impulsor. A mayor tamaño de burbujas menor es el tiempo de ascenso de las mismas y menor el grado de dispersión del gas en la mezcla.
- Formación de vórtice, regresión de burbujas y acumulación de gas en el impulsor: la presencia de estos fenómenos implican que el gas está siendo atrapado en el sistema.
- Llegada de burbujas a la superficie: es la evidencia visual de la salida del gas del líquido, es decir, la separación de las fases.

Para que la influencia de la agitación en la disminución del tiempo de ascenso de las burbujas sea positiva, se espera que: el tamaño de las burbujas a la salida del impulsor no disminuya, las burbujas alcancen la superficie y no haya formación de vórtice, regresión de burbujas ni acumulación de gas en el impulsor.

Como estos rasgos representan en si criterios para la evaluación del proceso de agitación, se diseñó un formato para reportar el comportamiento de cada impulsor con respecto a éstos. En la Tabla 25 se presenta un ejemplo del formato.

Tabla 25. Tabla de observación de experimentos

Observaciones	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	HI 1-AH	HI 2-AH	HI 1-AH	HI 2-AH	HI 1-AH	HI 2-AH
Tamaño de burbujas						
Vórtice [mm]						
Llegada de burbujas						
Regresión de burbujas						
Acumulación de gas en el impulsor						

El reporte de los experimentos se expondrá de la siguiente forma:

Tamaño de burbujas: será reportado en función de su diámetro ( $d_b$ ), comparándolo cualitativamente con el diámetro a la salida del filtro ( $d_{bI}$ ).

Vórtice: si se forma se dará un estimado de su profundidad y si no se colocará (-).

Llegada de burbujas, regresión de burbujas y acumulación de gas en el impulsor: se reportará con un sí o un no, dependiendo de si se presenta o no el fenómeno.

### 3.5.1. Selección del Sistema Líquido-Gas y las Condiciones de Trabajo

Antes de iniciar las pruebas experimentales se definieron los parámetros de trabajo que manejaría el Banco de Pruebas, los cuales son: presión y temperatura de trabajo y tiempo máximo.

#### 3.5.1.1. Presión y temperatura de trabajo

En base a que la máxima presión de trabajo es 80 psi, se decidió trabajar con una presión de 70 psi para mayor seguridad. Como ya se ha mencionado antes, la temperatura de trabajo sería de 20°C.

#### *Líquidos de prueba*

En la sección 3.3.3.2 se definió que los fluidos a utilizar tienen que poseer un volumen de 600 cc, una densidad aproximada a 0,9821 g/cc y una viscosidad cercana a 500, 3.000 y 6.000 cP.

Para ello se seleccionaron patrones de viscosidad, los cuales son aceites minerales certificados en su valor de viscosidad. Poseen un comportamiento newtoniano, aunque si se realiza la medida de la viscosidad a un alto esfuerzo cortante puede ocurrir una desviación de este comportamiento.

Debido al alto costo de estos patrones de viscosidad, se realizó una búsqueda de los mismos dentro de PDVSA Intevp. En la Tabla 26 se muestran los patrones encontrados.

Tabla 26. Características de los Patrones de Viscosidad a 20°C

Nº	Viscosidad [cP]	Densidad [g/ml]	Volumen [cc]
1	37,55	0,8603	470
2	281,7	0,8701	870
3	569,3	0,8748	460
4	1.110	0,8842	200
5	2.025	0,8914	300

continuación Tabla 26			
6	2.846	0,8768	350
7	7.710	0,8764	120
8	8.330	0,8764	120
9	9.252	0,8768	350
10	35.940	0,8901	860

Los patrones de viscosidad encontrados no disponían del suficiente volumen o de la viscosidad deseada. Por este motivo, en base al cálculo de la viscosidad efectiva y del promedio de densidad de una mezcla de líquido-líquido, expuesta por Uhl, V. y Gray, J. (1966a), se mezclaron aceites de diferentes viscosidades:

$$\mu_m = (\mu_x)^x (\mu_y)^y \quad \rho_{av} = X\rho_x + Y\rho_y$$

La selección de los patrones de viscosidad a mezclar y el volumen de cada uno se escogió mediante un proceso de tanteo, en el cual se variaron las viscosidades y las proporciones según los valores mostrados en la Tabla 26.

En la Tabla 27 se presentan la viscosidad y la densidad de los aceites utilizados.

Tabla 27. Características de los Patrones de Viscosidad a 20°C

Fluido	$\mu_1$ [cP]	$\mu_2$ [cP]	$\rho_1$ [g/ml]	$\rho_2$ [g/ml]	$V_1$ [l]	$V_2$ [l]	$\mu_m$ Teórica [cP]	$\rho_m$ [g/ml]
1	2.846	281,7	0,8768	0,8701	290	870	<b>502</b>	0,8718
2	35.940	569,3	0,8901	0,8748	310	460	<b>3.020</b>	0,8810
3	35.940	37,55	0,8901	0,8603	550	194	<b>6.002</b>	0,8823

Para corroborar la viscosidad estimada de las mezclas se realizaron sus mediciones en un viscosímetro electromagnético VINCI. En la Tabla 28 se exponen la viscosidad estimada (teórica) y la medida (experimental) para cada fluido; estas mediciones se pretendieron realizar antes de llevar a cabo las pruebas experimentales;

sin embargo debido a la disponibilidad limitada del equipo se tuvieron que realizar terminadas las pruebas experimentales.

Tabla 28. Comparación entre viscosidad teórica y viscosidad práctica

Fluido	$\mu_m$ Teórica [cP]	$\mu_m$ Experimental [cP]
1	502	490
2	3.020	2.350
3	6.002	5.140

Como se aprecia en la Tabla 28 la diferencia entre la viscosidad teórica y la práctica aumentó a medida que aumenta la viscosidad, esto se puede atribuir al hecho de que la ecuación de estimación de viscosidad efectiva se ha encontrada únicamente valida para fluidos de baja viscosidad (Uhl y Gray, 1966b).

### ***Gas de prueba***

Se escogió entre los gases que se emplean dentro de los laboratorios de PDVSA Intevep un gas cuya densidad a temperatura de 20 °C y presión de 70 psi estuviera dentro del rango calculado en la sección 3.3.3.2. Empleando una hoja de cálculo ya existente, se introdujeron los valores de temperatura y presión de trabajo y las temperaturas y presiones críticas de diferentes gases y se obtuvieron las densidades de los gases mostradas en la Tabla 29.

Tabla 29. Densidades de gases a condiciones de trabajo de las pruebas

Gas	Temperatura crítica [K]	Presión crítica [MPa]	$\rho_G$ [g/m <sup>3</sup> ]
Aire	132,45	3,79	6.589,3
Nitrógeno	2,31	0,16	6.375,3
Helio	56,05	2,40	910,4
CO <sub>2</sub>	0,96	0,075	10.337,5

Ya que el CO<sub>2</sub> es el único de los gases cuya densidad se encuentra dentro del rango anteriormente mencionado, se escogió como el gas de prueba.

### ***Caudal y tiempo de inyección del gas de prueba***

Para determinar el caudal de inyección del gas de prueba se realizaron ensayos previos con el banco de pruebas a condiciones de trabajo y con el sistema líquido-gas

seleccionado. En estas pruebas se precisaron diferentes caudales de inyección para cada líquido de prueba, de manera de tener dentro del recipiente a presión una alta frecuencia de burbujas del menor diámetro posible. Luego, se escogió un caudal que fuera conveniente para los tres líquidos de prueba, correspondiendo éste a 2 cc/min.

Teniendo definido el caudal, se pasó a calcular el tiempo de inyección de las burbujas de CO<sub>2</sub> para un volumen de 195 cc. Se encontró que este tiempo correspondería a 97,5 min., lo cual no era un valor viable para los experimentos. Se decidió entonces establecer como tiempo de inyección 10 min., desestimando el volumen del gas de prueba determinado anteriormente.

### 3.5.1.2. Tiempo Máximo

Como ya se explicó en la anteriormente, el sistema de agitación deberá ayudar a disminuir el tiempo de ascenso de las burbujas, por lo cual el tiempo máximo vendrá dado por el tiempo que tardan las burbujas en subir bajo las mismas condiciones (Presión del sistema: 70 psi, Presión de inyección del gas: 110 psi, Caudal de inyección: 2 cc/min, Tiempo de inyección: 10 min.) de las pruebas pero sin presencia de agitación. Es por ello que se realizaron unas pruebas previas al experimento para determinar cual es este tiempo máximo de ascenso de burbujas para cada fluido.

Tabla 30. Tiempos máximos de ascenso de burbujas.

Observaciones	Fluido 1 (500 cP) $t_{1max}$ [']	Fluido 2 (3.000 Cp) $t_{2max}$ [']	Fluido 3 (6.000 cP) $t_{3max}$ [']
1	11,87	12,33	12,24
2	13,26	11,53	12,02
3	12,54	12,83	12,95
4	12,34	13,10	12,05
5	12,17	12,43	12,92
6	11,91	11,98	13,01
7	12,48	12,62	11,75
8	12,91	12,96	12,35
9	11,89	11,71	12,16
10	12,22	12,92	12,90
$\bar{X}$ [min]	12,36	12,44	12,44
$s$ [min]	0,46	0,55	0,47

Se realizaron 10 mediciones del tiempo para cada fluido, luego se les calculó la media y la desviación estándar.

La dispersión de cada tiempo con respecto a la media es muy pequeña, por lo cual se puede tomar el valor de la media como el tiempo que tardan las burbujas en ascender. El valor de la media de los tiempos máximos de cada fluido es muy cercano e inclusive igual en el caso de los fluidos de 3.000 y 6.000 cP.

De acuerdo a lo observado en los experimentos a medida que la viscosidad aumenta el diámetro de las burbujas también lo hace, pero la frecuencia de salida de las burbujas disminuye. Lo anteriormente expuesto conlleva a que los tiempos sean similares independientemente de la viscosidad del fluido. El fenómeno del aumento del diámetro de las burbujas con respecto al aumento de la viscosidad era de esperarse dada la teoría expuesta en la sección 2.3.10.1 de formación de burbujas.

Durante el desarrollo de este capítulo se analizaron los sistemas de agitación de equipos PVT para petróleo negro disponibles en el mercado y se realizó una propuesta general del sistema de agitación de un equipo PVT libre de mercurio para crudos pesados.

Se formuló una metodología experimental para el estudio del tiempo de ascenso de burbujas de gas en líquidos viscosos, en donde se evalúa la relación  $D/T$  y la influencia del implemento de diferentes modelos de impulsores.

Se diseñaron y construyeron tres modelos básicos de impulsores tipo turbina en dos relaciones de tamaño y; se diseñó y construyó un Banco de Pruebas que permite representar diversas operaciones de agitación a escala de laboratorio.

En el siguiente capítulo se va a presentar el análisis de resultados de la metodología desarrollada en este capítulo.

## CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan el análisis de resultados de los experimentos realizados para la evaluación de: (a) la relación del diámetro de impulsor con respecto al diámetro del recipiente ( $D/T$ ) en los tres modelos básicos de impulsores tipo turbina (disco de hojas planas, hojas planas y hojas inclinadas); y (b) el desempeño de los diferentes modelos de impulsores (turbina de disco de hojas planas, turbina de hojas planas, turbina de hojas inclinadas, alto rendimiento A-310 y alto rendimiento A-100); en el tiempo de ascenso de burbujas de gas a través de un líquido.

Los resultados y el análisis de los mismos serán expuestos siguiendo la metodología experimental diseñada en la sección 3.6, y para que el lector tenga presente la nomenclatura empleada en la exposición de los resultados, ésta se presenta nuevamente en la Tabla 31.

Tabla 31. Nomenclatura de Impulsores.

Impulsor	Sentido de giro	$D/T$	Nomenclatura
Turbina de hojas planas	-	1/3	HP 1
Turbina de hojas planas	-	0,85	HP 2
Turbina de disco de hojas planas	-	1/3	DHP 1
Turbina de disco de hojas planas	-	0,85	DHP 2
Turbina de hojas inclinada	Horario	1/3	HI 1-H
Turbina de hojas inclinada	Horario	0,85	HI 2-H
Turbina de hojas inclinada	antihorario	1/3	HI 1-AH
Turbina de hojas inclinada	antihorario	0,85	HI 2-AH
Alto rendimiento A-310	Horario	-	A-310-H
Alto rendimiento A-310	antihorario	-	A-310-AH
Alto rendimiento A-100	Horario	-	A-100-H
Alto rendimiento A-100	antihorario	-	A-100-AH

### 4.1. Fase A. Evaluación de la relación $D/T$ : Resultados y sus análisis.

Se presentan y analizan los resultados de las pruebas realizadas para determinar la relación  $D/T$  (relación entre el diámetro del impulsor y diámetro del recipiente) que favorece más el ascenso de burbujas de gas a través de un líquido viscoso.

En esta fase los tiempos de ascenso de burbujas no se van a exponer ya que correspondieron con el tiempo máximo establecido para la duración de cada prueba.

En la Tabla 32, Tabla 33, Tabla 34 y Tabla 35 se muestran las observaciones de cada prueba experimental. Las pruebas experimentales con DHP 1, HP 1, HI 1-H y HI 1-AH, en el fluido de 6.000 cP se interrumpieron; debido a que el alto grado de dispersión que surgió impedía la observación.

Tabla 32. Disco de hojas planas,  $N_{Re} = 7$  al variar la relación D/T

Observaciones	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	DHP 1	DHP 2	DHP 1	DHP 2	DHP 1	DHP 2
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	*	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$
Vórtice [mm]	-	-	4	-	13	6
Llegada de burbujas	si	si	no	no	no	No
Regresión de burbujas	si	no	si	si	si	Si
Acumulación de gas en el impulsor	no	no	no	no	no	No

Tabla 33. Hojas planas,  $N_{Re} = 7$  al variar la relación D/T

Observaciones	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	HP 1	HP 2	HP 1	HP 2	HP 1	HP 2
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	*	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$
Vórtice [mm]	-	-	10	-	13	5
Llegada de burbujas	si	si	no	no	no	No
Regresión de burbujas	si	no	si	si	si	Si
Acumulación de gas en el impulsor	no	no	si	si	no	Si

Tabla 34. Hojas inclinadas, sentido horario,  $N_{Re} = 7$  al variar la relación D/T

Observaciones	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	HI 1-H	HI 2-H	HI 1-H	HI 2-H	HI 1-H	HI 2-H
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	*	$d_{bl} \ll d_b$ $d_{bl} < d_b$
Vórtice [mm]	-	-	10	-	13	4
Llegada de burbujas	si	si	si	no	no	No
Regresión de burbujas	si	no	si	si	si	Si
Acumulación de gas en el impulsor	no	no	si	si	si	Si

Tabla 35. Hojas inclinadas, sentido antihorario,  $N_{Re} = 7$  al variar la relación  $D/T$ 

Observaciones	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	HI 1-AH	HI 2-AH	HI 1-AH	HI 2-AH	HI 1-AH	HI 2-AH
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} < d_b$
Vórtice [mm]	-	-	10	-	13	5
Llegada de burbujas	si	si	si	no	no	No
Regresión de burbujas	no	no	si	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	no	no	si	si	si	si

Durante el desarrollo de las pruebas se observó un incremento de la tendencia a la formación del vórtice conforme aumenta la viscosidad del líquido de prueba, para una misma relación  $D/T$ , independientemente del modelo del impulsor. El enfoque adimensional que se le dio a la Fase A de las pruebas exigía mantener constante la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (Número de Reynolds) en el líquido de prueba. Esto conllevó un aumento de la velocidad angular del impulsor, con el consecuente incremento de la velocidad tangencial; reflejada ésta en el estudio de la agitación como la responsable directa de la formación del vórtice.

Por otro lado, el vórtice se formó primero y con un crecimiento más marcado para la relación  $D/T = 1/3$  que para la relación  $D/T = 0,85$ . Este fenómeno corresponde con lo esperado, según el Número de Reynolds, ya que una disminución del diámetro del impulsor, aumenta la velocidad angular y por ende el vórtice, tal como se explicó anteriormente. La potencia cuadrática del término del diámetro del impulsor ( $D$ ) en el Número de Reynolds acentúa la influencia de este término sobre el vórtice; por lo que era de esperarse que el vórtice formado por un impulsor de menor diámetro tuviera una mayor profundidad con respecto al formado por su semejante de mayor diámetro.

Al disminuir la relación  $D/T$  para un mismo modelo de impulsor, se apreció que el tamaño de las burbujas a la salida de éste tiende a disminuir. Un menor diámetro de burbuja implica un mayor tiempo de ascenso de las mismas, y también puede ser indicativo de la existencia de dispersión de gas dentro del líquido de muestra.

La evaluación de la menor relación  $D/T$  en el fluido de 6.000 cP se interrumpió producto de un alto grado de dispersión del gas en el fluido, no permitiendo observar el desempeño de los impulsores. Los efectos del aumento de la viscosidad y disminución del diámetro del impulsor, anteriormente expuestos, explican el hecho de que se haya tenido que suspender la ejecución de las pruebas.

Con base a todos los razonamientos anteriores se escogió la relación  $D/T = 0,85$  como la relación  $D/T$  más favorable en el ascenso de las burbujas del gas de prueba.

#### **4.2. Fase B. Evaluación de los modelos de impulsores: Resultados y sus análisis**

En esta sección se presentan y analizan los resultados de las pruebas realizadas para evaluar el desempeño de los diferentes modelos de impulsores seleccionados anteriormente.

Las pruebas inicialmente fueron concebidas para  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ ; sin embargo, a raíz de los resultados arrojados en la Fase A, en la que se observó la tendencia a la formación del vórtice con el aumento de la velocidad angular, y la presencia del mismo en la viscosidad de 6.000 cP, acarreó que se decidiera disminuir en la misma proporción planteada el  $N_{Re}$  para así evitar la formación del vórtice. No obstante, para el fluido de 500 cP la disminución a la mitad del  $N_{Re}$  implicaba trabajar con velocidades angulares fuera del alcance del motor ( $< 40$  rpm). Por lo tanto, las pruebas se replantearon para trabajar de la siguiente manera:  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$  para 500 cP, mientras  $N_{Re}=3,5$  y  $N_{Re}=7$  para 3.000 y 6.000 cP.

En la Tabla 36 se presenta los tiempos de ascenso de las burbujas en las diferentes pruebas experimentales; se omitieron los resultados de las pruebas que obtuvieron un tiempo de ascenso igual al tiempo máximo.

Tabla 36. Tiempo de ascenso de burbujas para la Fase B

Viscosidad [cP]	Impulsor	$N_{Re}$	N [rpm]	$t_1$ [']	$t_2$ [']
500	HP 2	14	94	12 10	12 05
	HI 2-H	14	82	11 47	11 40
	HI 2-AH	7	41	11 50	11 37
	HI 2-AH	14	82	12 06	12 01
	A-100-H	7	40 <sup>a</sup>	12 10	12 20
	A-100-H	14	79	11 56	11 54
	A-100-AH	7	40 <sup>a</sup>	12 17	12 13
	A-100-AH	14	79	12 19	12 02
3.000	DHP 2	3,5	167	12 15	12 11
6.000	HP 2	3,5	279	11 22	11 57
	A-100-AH	7	465	11 34	10 46

<sup>a</sup> El valor corresponde a 39 rpm pero por limitaciones del motor será evaluado en 40 rpm, la cual corresponde con la velocidad mínima del motor

A diferencia de la Fase A, en esta fase se obtuvieron tiempos de ascenso de burbujas menores al tiempo máximo. Al ser esta variable respuesta la que identifica el objetivo de las pruebas experimentales, el análisis de esta fase se va apoyar en primera instancia en los tiempos de ascenso de las burbujas, y se va complementar con la observación de los experimentos.

En base a los tiempos de ascenso de las burbujas los impulsores preseleccionados fueron los presentados en la Tabla 37.

Tabla 37. Impulsores seleccionados de la Fase B

Viscosidad [cP]	Impulsor	$N_{Re}$	N [rpm]
500	HP 2	14	94
500	HI 2-H	14	82
500	A-100-H	14	79
3.000	DHP 2	3,5	167
6.000	HP 2	3,5	279
6.000	A-100-AH	7	465

A continuación se muestran las observaciones de las pruebas experimentales correspondientes a la Fase B.

Tabla 38. Disco de hojas planas,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	DHP 2					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	6
Llegada de burbujas	Si	si	si	no	no	No
Regresión de burbujas	No	si	si	si	si	Si
Acumulación de gas en el impulsor	No	no	si	no	Si	No

Tabla 39. Hojas planas,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	HP 2					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	5
Llegada de burbujas	Si	si	si	no	si	no
Regresión de burbujas	Si	no	si	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	No	no	no	si	si	si

Tabla 40. Hojas inclinadas, sentido horario,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	HI 2-H					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$ $d_{bl} < d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	4
Llegada de burbujas	Si	si	si	no	no	no
Regresión de burbujas	No	si	si	si	Si	si
Acumulación de gas en el impulsor	No	no	no	si	Si	si

Tabla 41. Hojas inclinadas, sentido antihorario,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	HI 2-AH					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} > d_b$ $d_{bl} < d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	2	5
Llegada de burbujas	Si	si	si	no	no	no
Regresión de burbujas	No	no	si	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	No	no	si	si	no	si

Tabla 42. A-310, sentido horario,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	A-310-H					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	2
Llegada de burbujas	Si	si	si	no	no	no
Regresión de burbujas	No	no	si	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	Si	si	si	si	si	si

Tabla 43. A-310, sentido antihorario,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	A-310-AH					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} > d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	2
Llegada de burbujas	No	si	Si	si	no	no
Regresión de burbujas	No	no	No	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	Si	si	Si	si	ni	si

Tabla 44. A-100, sentido horario,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	A-100-H					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} > d_b$ $d_{bl} < d_b$	$d_{bl} \ll d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	3
Llegada de burbujas	Si	si	Si	si	si	si
Regresión de burbujas	No	si	No	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	No	no	Si	si	si	si

Tabla 45. A-100, sentido antihorario,  $N_{Re}=7$  y  $N_{Re}=14$ 

Observaciones	A-100-AH					
	500 cP		3.000 cP		6.000 cP	
	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 14$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$	$N_{Re} = 3,5$	$N_{Re} = 7$
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$	$d_{bl} \ll d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-	-	-	1
Llegada de burbujas	Si	si	Si	si	si	si
Regresión de burbujas	No	no	Si	si	si	si
Acumulación de gas en el impulsor	No	no	Si	si	si	si

Los impulsores preseleccionados para 3.000 cP (DHP 2) y 6.000 cP (HP 2 y A-100-AH) fueron descartados ya que presentan regresión de burbujas y acumulación de las mismas en el impulsor; en cambio, los impulsores preseleccionados para 500 cP, a parte de dar un tiempo de ascenso de las burbujas cumplieron con las siguientes condiciones deseadas: no presencia de vórtice, ascenso de las burbujas hasta la superficie del líquido, y no regresión del gas y acumulación del mismo en el impulsor.

### ***Fase C. Evaluación a rpm constantes.***

Hasta el momento las pruebas se realizaron variando la velocidad angular para un Número de Reynolds dado; como esta metodología no arrojó resultados

satisfactorios para 3.000 y 6.000 cP, se procedió a hacer una inversión de variables, manteniéndose ahora las rpm constante. Esto constituyó una nueva fase de evaluación (Fase C) en la cual para los fluidos de 3.000 y 6.000 cP, se evaluaron los impulsores bajo las rpm que tuvieron en el fluido de 500 cP.

En la Tabla 46 se presentan los tiempos de ascenso de las burbujas en las diferentes pruebas experimentales.

Tabla 46. Tiempo de ascenso de burbujas, N constantes

Viscosidad [cP]	Impulsor	N [rpm]	t <sub>1</sub> [']	t <sub>2</sub> [']
500	HP2	94	12 10	12 05
	HI2-H	82	11 47	11 40
	A-100-H	79	11 56	11 54
3.000	HP2	94	11 54	11 45
	HI2-H	82	11 15	11 13
	A-100-H	79	11 26	11 30
6.000	HP2	94	t <sub>máx</sub>	t <sub>máx</sub>
	HI2-H	82	12 18	12 15
	A-100-H	79	t <sub>máx</sub>	t <sub>máx</sub>

En la Tabla 47, Tabla 48 y Tabla 49 se presentan las observaciones de las pruebas experimentales correspondientes a la Fase C.

Tabla 47. Hojas planas, N=94 rpm

Observaciones	HP (94 rpm)		
	500 cP	3.000 cP	6.000 cP
Tamaño de burbuja	d <sub>bl</sub> < d <sub>b</sub> d <sub>bl</sub> = d <sub>b</sub>	d <sub>bl</sub> < d <sub>b</sub> d <sub>bl</sub> = d <sub>b</sub>	d <sub>bl</sub> < d <sub>b</sub> d <sub>bl</sub> = d <sub>b</sub>
Vórtice [mm]	-	-	-
Llegada de burbujas	si	si	si
Regresión de burbujas	no	no	si
Acumulación de gas en el impulsor	no	si	si

Tabla 48. Hojas inclinadas, sentido antihorario, N=82 rpm

Observaciones	HI-H (82 rpm)		
	500 cP	3.000 cP	6.000 cP
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-
Llegada de burbujas	si	si	si
Regresión de burbujas	no	no	no
Acumulación de gas en el impulsor	no	no	no

Tabla 49. A-100, sentido antihorario, N=79 rpm

Observaciones	A-100-H (79 rpm)		
	500 cP	3.000 cP	6.000 cP
Tamaño de burbuja	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} = d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$	$d_{bl} < d_b$ $d_{bl} > d_b$
Vórtice [mm]	-	-	-
Llegada de burbujas	si	si	si
Regresión de burbujas	no	no	no
Acumulación de gas en el impulsor	no	no	no

La realización de las pruebas, para una misma velocidad angular, dio como resultados patrones de comportamiento de la unidad experimental muy similares en todos los fluidos de prueba. Lo cual conlleva a deducir que la velocidad angular es un factor determinante en el régimen de flujo e inclusive, para las condiciones de estas pruebas, de mayor influencia que el Número de Reynolds.

Todos los impulsores evaluados en esta última parte tienen un comportamiento propicio para la disminución del tiempo de ascenso de las burbujas; y todos dieron tiempos de ascenso de burbujas menores al tiempo máximo para los fluidos de 500 y 3.000 cP. Para el fluido de 6.000 cP sólo el HI 2-H arrojó un tiempo de ascenso de burbuja menor al tiempo máximo.

El modelo HI 2-H mostró el mejor desempeño para los tres líquidos ya que obtuvo los menores tiempos de ascenso de burbujas para los tres fluidos de prueba, evidenciándose su funcionalidad independientemente de la viscosidad del líquido de muestra.

## CONCLUSIONES

Los estudios PVT simulan el agotamiento volumétrico e isotérmico de la presión de un yacimiento. La reducción de la presión desencadena un proceso de transferencia de masa en el cual el gas asociado al petróleo se libera, coexistiendo la fase líquida y la gaseosa. En los estudios PVT se requiere el equilibrio de las fases presentes, equilibrio que por mecanismo naturales implicaría largos tiempos de prueba. Esto hace necesario que los equipos PVT dispongan de sistemas de agitación que agilicen este proceso. En este trabajo se diseñó y construyó el sistema de agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados; a continuación se presentan las conclusiones a las que se llegó durante su realización:

- Los crudos pesados difieren en gran medida de los medianos y livianos por sus altas viscosidades, provocando que en los crudos pesados el tiempo para alcanzar el equilibrio de las fases sea considerablemente mayor en comparación con el resto de los crudos. Esto evidencia la gran importancia que tiene la viscosidad en la agitación de crudos pesados, motivo por el cual debe tomarse como parámetro principal en el diseño de sistemas de agitación para crudos pesados.
- Al realizar la evaluación de los sistemas de agitación de los equipos PVT libres de mercurio para petróleo negro existentes en el mercado, se encontró que la mayoría de estos sistemas no operan en todo el rango de viscosidad de los crudos pesados; dichos sistemas tienen como característica común que la perturbación del fluido no se imparte desde el seno del mismo. Por otro lado, el equipo que sí lo hace abarca todo el rango de viscosidad pero presenta problemas de fuga de muestra. Todo lo anterior indica que ninguno de los diseños evaluados es apto para trabajar eficazmente con crudos pesados y que la agitación debe realizarse desde el seno de los mismos.

- La teoría de agitación está enfocada en el estudio de los procesos de mezcla de dos o más fluidos y no en la separación de los mismos; este hecho aunado a las características propias de los crudos pesados en los estudios PVT exigió el diseño de una metodología que permitiera evaluar la influencia de diferentes variables sobre la separación de fases. La implementación de esta metodología es el primer paso dado para el estudio de la agitación dentro de las pruebas PVT y permitió conocer la incidencia de las variables estudiadas en el tiempo de estabilización de las fases.
- Al igual que en las aplicaciones industriales que requieren de agitación mecánica, en el caso de los estudios PVT, la variación de las relaciones geométricas definidas a partir de la agitación mecánica tienen un gran efecto en el papel de la agitación dentro de la estabilización de las fases. En vista de esto se seleccionaron como parámetros a evaluar: la relación del diámetro del impulsor con respecto al diámetro del recipiente ( $D/T$ ) y los modelos del impulsores tipo turbina y alto rendimiento.
- Seis impulsores tipo turbina fueron diseñados y construidos en función de los tres modelos básicos de turbinas: disco de hojas planas, hojas planas y hojas inclinadas, para dos relaciones  $D/T$ .
- Se construyó un Banco de Pruebas que permite evaluar la influencia de la agitación de líquidos viscosos sometidos a presión en el ascenso de burbujas de gas a través de los mismos. La versatilidad de este banco permite tener una total percepción y registro visual de los procesos llevados a cabo en él, permitiendo la variación de una gama de parámetros de operación tales como: presión del sistema, velocidad angular del impulsor, caudal de inyección del gas. Además, permite la medición digital de la velocidad angular, el torque, la presión y el tiempo de observación del fenómeno. Por todas las características que reúne el Banco de Pruebas, su uso no se limita sólo al análisis de la agitación dentro de los estudios PVT, sino que permite estudiar a escala de laboratorio diferentes operaciones industriales de agitación.

- El análisis experimental desarrollado para la evaluación de los prototipos de agitadores mecánicos determinó que el modelo de impulsor tipo turbina de hojas inclinadas, girando en sentido horario, con una relación  $D/T=0,85$ , es el más apto para disminuir el tiempo de ascenso de burbujas de gas en crudos pesados.
- Se construyó un sistema de agitación de un Equipo PVT Libre de Mercurio para Crudos Pesados, capaz disminuir el tiempo de separación de las fases para muestras de crudo con viscosidades de hasta aproximadamente 6.000 cP y volumen de 600 cc, según lo planteado. El tratamiento adimensional dado al desarrollo de los prototipos de los sistemas de agitación permitió obtener un modelo adaptable para diferentes dimensiones de la celda PVT. Este sistema de agitación representa toda una novedad, ya que actualmente no existen equipos PVT libres de mercurio que trabajen eficazmente con crudos pesados.

## RECOMENDACIONES

- Con el objeto de representar mejor las condiciones presentes en los estudios PVT durante próximos experimentos de agitación, se sugiere buscar otras alternativas de inyección del gas de prueba que permitan la formación y mejor distribución de burbujas del mismo diámetro en líquidos de muy diferentes viscosidades.
- En caso de un futuro rediseño del impulsor, se recomienda adoptar mecanismos que permitan el estudio de impulsores presentando descarga axial; a fin de determinar el impacto de ésta sobre el ascenso de las burbujas del líquido de prueba. Estos mecanismos pueden ser: desde la instalación de mamparas de pared dentro del recipiente de pruebas, hasta el ensayo de modelos de impulsor provistos de un anillo alrededor de su periferia.
- En vista de que el diseño seleccionado para el sistema de agitación tiene una forma simple, se sugiere al considerar un rediseño del mismo, se varíen parámetros geométricos como: ángulo de inclinación, ancho y número de las hojas.
- Realizar pruebas PVT utilizando el impulsor tipo turbina de hojas inclinadas, girando en sentido horario, con una relación  $D/T=0,85$ , y compararlo con los sistemas de agitación disponibles en cuento al tiempo de estabilización de ambos.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Balestrini, M. (2001). *Como se elabora el proyecto de investigación*. (5ª ed.). Caracas: BL Consultores Asociados, Servicio Editorial.
- Bánzer, C. (1996). *Correlaciones numéricas P.V.T.* Maracaibo: Universidad del Zulia, Instituto de Investigaciones petroleras, Fundación Laboratorio de Servicios Técnicos Petroleros.
- Barberii, E. (1998). *El pozo ilustrado*. [Datos en DC]. Disponible: FONCIED.
- Birley, A. y Sooh, M. (1989). *Plastics materials: properties and applications*. New York: Leonard Hill.
- Bradley, H. (1992). *Petroleum engineering handbook*. (3a ed.). Estados Unidos: Society of Petroleum Engineers.
- Brodkey, R y Hershey, H. (1988). *Transport phenomena: a unified approach*. Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company.
- Cross, N. (2005). *Métodos de diseño: Estrategias para el diseño de productos*. México: Limusa Wiley.
- Danesh, A. (1998). *PVT and phase behavior of petroleum reservoir fluids*. Edinburgh, Scotland: Elsevier Science B.V.
- Daniels, C. (1989). *Polymers structure and properties*. Lancaster: Technomic publishing CO, Inc.
- Gudiel, M. (2005). *El proceso de diseño en ingeniería mecánica*. Versión 1.0. Trabajo no publicado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Kohan, A. (1987). *Pressure vessel system*. New York: McGraw-Hill.
- Kumaresan, J. y Jyestharajm B. (2006). Effect of impeller design on the flow pattern and mixing in stirred tanks. *Chemical Engineering Journal*, 115, 173-193.
- McCain, W. (1990). *The properties of petroleum fluids*. (2a ed.). Estados Unidos: Penwell.

- 
- Mendelson, H. (1967). The prediction of bubble terminal velocities from wave theory. *A.I.Ch.E Journal*. 13(2), 250-253.
  - Milani, Rodolfo. (1986). *Diseño para nuestra realidad*. Caracas: Equinoccio Editorial de la Universidad Simón Bolívar.
  - Mott, R. (1995). *Diseño de elementos de máquinas*. (2a ed.). Mexico: Prentice Hall.
  - Paul, E; Atiemo-Obeng, V y Kresta, S. (2004). *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. Estados Unidos: Wiley-Interscience.
  - Perry, R y Green, D. (2001). *Manual del ingeniero químico*. (4a ed). España: McGraw-Hill.
  - Peterson, K., Fedenslund, A. y Thomassen. (1989). *Properties of oil and natural gases*. Texas: Gulf Publishing Company.
  - Popov, E. (1982). *Mecánica de materiales*. Mexico: Limusa.
  - Ramsey, W. y Zoller, G. (1976, Agosto 30). How the design of shafts, seals and impellers affects agitators performance. *Chemical Engineering*, 101-108.
  - Rojas, G. (s.f.). *Actualización en ingeniería de yacimientos*. Módulo III. Propiedades de los fluidos y rocas de yacimientos petrolíferos. PDVSA, CIED.
  - Ruszkowski, S. (1993). *Design guide for impeller power numbers*. Inglaterra: FMP.
  - Shackerford, J. (1995). *Ciencia de materiales para ingenieros*. (3a ed.). Mexico: Prentice Hall.
  - Shigley, J y Mischke, C. (1990). *Diseño en ingeniería mecánica*. (4a ed.). Mexico: McGraw-Hill.
  - Shigley, J y Mitchell, L. (1989). *Manual de diseño mecánico*. Tomo II. (3a ed.). Mexico: McGraw-Hill.
  - Tarek, A. (2000). *Reservoir engineering handbook*. Texas: Gulf Publishing Company.
  - Treybal, R. (1998). *Operaciones de transferencia de masa*. (2a ed.), Mexico: McGraw-Hill.

- Uhl, V y Gray, J. (1966a). *Mixing: theory and practice*. Volume I. Estados Unidos: Academic Press.
- Uhl, V y Gray, J. (1966b). *Mixing: theory and practice*. Volume II. Estados Unidos: Academic Press.
- Universidad Pedagógica Experimental Libertador. (2005). *Manual de trabajos de grado de especialización y maestría y tesis doctorales*. (3a ed.). Caracas: FEDEUPEL.
- Vilar, J. (2006). *Modelos Estadísticos Aplicados, Monografía 101*. (2 ed.). España: Publicaciones de la Universidad de la Coruña
- Whitson, C y Brule, M. (2000). *Phase behavior, Monograph Vol 20*. Texas: Society of Petroleum Engineers.

**Otras Publicaciones:**

- Berdugo, V., BJOROY, R., RICHARDS, C., MACWILLIAM, D.; RIDING, M y ROSS, B, SPE, Schlumberger. (2005). *Removing mercury from the workplace: A case history of the decommissioning and recycling of mercury-contaminated equipment*. [Publicación en línea]. Journal of Petroleum Technology (Tomado de la página web de la Society of Petroleum Engineers Paper No. 96461-MS). Disponible en: <http://www.spe.org/> [Consultada: 2006, Mayo 27]
- Caframo Real Torque Digital Stirres. (s.f.). Manual de instrucciones. Canada: Autor.
- Laugier, S; Richon, D. (1987). Micro-PVT apparatus without mercury. [Publicación en línea]. Journal SPE Formation Evaluation (Tomado de la página web de la Society of Petroleum Engineers Paper No. 14532-PA). Disponible en: <http://www.spe.org/> [Consultada: 2006, Mayo 27]
- Ruska Instrument Corporation. (1992). Ruska Mercury-Free PVT School. Houston, Texas: Autor.
- Sastoque, M. (2003) *Diseño de una celda de alta presión para realizar estudios PVT (presión, volumen, temperatura) libre de mercurio*. Tesis de grado no

publicada, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Caracas.

- Sastoque, M; Borges, A; Tavera, J y Hernández V. (en imprenta). *Estado del arte de sistemas PVT libres de mercurio para crudos pesados y extrapesados*. (Informe N° INT-11396- 2007). Los Teques: PDVSA Intevep.
- Vidal, C. (2001). *Caracterización termodinámica (PVT) de fluidos de fondo y superficie provenientes del norte del Estado Monagas*. Tesis de grado no publicada, Universidad Simón Bolívar, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química, Sartenejas.

#### Consultas a Internet:

- Amar Equipment Pvt. (s.f.). [Página web en línea]. Disponible: [http://www.amarequip.com/magnetic\\_drive\\_coupling.asp](http://www.amarequip.com/magnetic_drive_coupling.asp) [Consultada: 2006, Octubre 02]
- Azon (2007). [Página web en línea]. Disponible en: <http://www.azom.com> [Consultada: 2006, Septiembre 19].
- Crotti, M y Bosco, S. (2001). La representatividad y el empleo de los estudios PVT: Primera parte - PVT de petróleos negros. [Documento en línea]. Disponible: <http://www.inlab.com.ar/index.html> [Consultada: 2006, Junio 07]
- Droctec. (2007). [Página web en línea]. Disponible: <http://www.drotec.com.ar/drotec.htm> [Consultada: 2006, Octubre 02]
- Geankoplis, C. (2003). *Transport processes and separation process principles*. [Libro en línea]. Pearson Education: Prentice Hall PTR. Disponible: <http://www.phptr.com/articles/article.asp?p=349046&seqNum=4&rl=1> [Consultada: 2006, Septiembre 01]
- Grajales, T. (2000). [Libro en línea]. *Estadística aplicada a la educación*. Disponible: <http://tgrajales.net/estaplicada.html> [Consultada: 2007, Abril 4]
- Hauke, G; Vidal, P y Blasco, J. (s.f.). *Experimentación con agitación industrial*. [Documento en línea]. Disponible:

- <http://ww.cps.unizar.es/~jblasco/agitacion.pdf> [Consultada: 2006, Septiembre 01]
- MixMor, Incorporated. (2005). [Página web en línea]. Disponible: <http://ww.agitadores.com> [Consultada: Septiembre 02]
  - Parlaktuna, M. (2004). [Libro en línea]. *Hydrocarbon phase behavior*. Disponible: <http://wildcat.petc.metu.edu.tr/mahmut/pete517.html>[Consultada: 2006, Junio 5]
  - Post Mixing Optimization and Solutions. (2005). [Página web en línea]. Disponible: <http://www.postmixing.com> [Consultada: Septiembre 02]

APÉNDICE A. Tablas

Tabla A-1. Parámetros de operación estimados para 500 cP

500 cP		T= 90 mm			T=100 mm		
		D =30 mm			D=33 mm		
N <sub>Re</sub>	N <sub>P</sub>	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]
10	8	346	0,03	0,001	281	0,03	0,001
10 <sup>2</sup>	3,6	3.463	14,13	0,048	2.805	15,71	0,043
10 <sup>3</sup>	3,8	34.630	1,49 x10 <sup>4</sup>	5,080	28.050	1,66 x10 <sup>4</sup>	4,572
10 <sup>4</sup>	5	346.300	1,97 x10 <sup>7</sup>	668,480	280.503	2,18 x10 <sup>7</sup>	601,632
		D=76,5 mm			D=70 mm		
N <sub>Re</sub>	N <sub>P</sub>	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]
10	8	52	0,01	0,002	62	0,015	0,002
10 <sup>2</sup>	3,6	522	6,10	0,112	623	6,665	0,102
10 <sup>3</sup>	3,8	5.220	6,44 x10 <sup>3</sup>	11,777	6.234	7,04 x10 <sup>3</sup>	10,777
10 <sup>4</sup>	5	52.197	8,47 x10 <sup>6</sup>	1549,658	62.340	9,26 x10 <sup>6</sup>	1417,988

Tabla A-2. Parámetros de operación estimados para 3.000 cP

3.000 cP		T= 90 mm			T=100 mm		
		D =30 mm			D=33 mm		
N <sub>Re</sub>	N <sub>P</sub>	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]
10	8	2.078	7,54	0,035	1.683	6,79	0,039
10 <sup>2</sup>	3,6	20.778	3,39 x10 <sup>3</sup>	1,559	16.830	3,05 x10 <sup>3</sup>	1,733
10 <sup>3</sup>	3,8	207.780	3,58 x10 <sup>6</sup>	164,606	168.302	3,22 x10 <sup>6</sup>	182,896
10 <sup>4</sup>	5	2.077.801	4,71 x10 <sup>9</sup>	21658,750	1.683.019	4,21 x10 <sup>9</sup>	24065,278
		D=76,5 mm			D=70 mm		
N <sub>Re</sub>	N <sub>P</sub>	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]
10	8	313	2,93	0,089	374	3,20	0,082
10 <sup>2</sup>	3,6	3.132	1,32 x10 <sup>3</sup>	4,017	3.740	1,44 x10 <sup>3</sup>	3,675
10 <sup>3</sup>	3,8	31.318	1,39 x10 <sup>6</sup>	423,986	37.404	1,52 x10 <sup>6</sup>	387,961
10 <sup>4</sup>	5	313.180	1,87 x10 <sup>9</sup>	55787,689	374.042	2,00 x10 <sup>9</sup>	51047,558

Tabla A-3. Parámetros de operación estimados para 6.000 cP

6.000 cP		T= 90 mm			T=100 mm		
		D =30 mm			D=33 mm		
N <sub>Re</sub>	N <sub>P</sub>	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]
10	8	4.156	6,93 x10 <sup>1</sup>	0,139	3.366	5,42 x10 <sup>1</sup>	0,154
10 <sup>2</sup>	3,6	41.556	2,71x10 <sup>4</sup>	6,238	33.660	2,44x10 <sup>4</sup>	6,931
10 <sup>3</sup>	3,8	415.560	2,86 x10 <sup>7</sup>	658,426	336.604	2,58 x10 <sup>7</sup>	731,584
10 <sup>4</sup>	5	4.155.601	3,77 x10 <sup>10</sup>	86634,999	3.366.037	3,39 x10 <sup>10</sup>	96261,110
		D=76,5 mm			D=70 mm		
N <sub>Re</sub>	N <sub>P</sub>	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]	N [r.p.m.]	P [W]	T [N.m]
10	8	626	2,34 x10 <sup>1</sup>	0,357	748	2,25 x10 <sup>1</sup>	0,327
10 <sup>2</sup>	3,6	6.264	1,05x10 <sup>4</sup>	16,067	7.481	1,15x10 <sup>4</sup>	14,702
10 <sup>3</sup>	3,8	62.636	1,11 x10 <sup>7</sup>	1695,946	74.808	1,21 x10 <sup>7</sup>	1551,846
10 <sup>4</sup>	5	626.360	1,46 x10 <sup>10</sup>	223150,755	748.085	1,59 x10 <sup>10</sup>	204190,233

Tabla A-4. Velocidad angular en un rango de N<sub>Re</sub> [0-20] para 500 cP.

500 cP	DHP		HP		HI		A-310	A-100
D [m]	0,0330	0,0655	0,0300	0,0715	0,0300	0,0765	0,0635	0,0787
N <sub>Re</sub>	N [rpm]							
1	32	8	38	7	38	6	9	6
2	63	16	76	13	76	12	17	11
3	95	24	115	20	115	18	26	17
4	126	32	153	27	153	24	34	22
5	158	40	191	34	191	29	43	28
6	190	48	229	40	229	35	51	33
7	221	56	268	47	268	41	60	39
8	253	64	306	54	306	47	68	44
9	284	72	344	61	344	53	77	50
10	316	80	382	67	382	59	85	56
11	348	88	421	74	421	65	94	61
12	379	96	459	81	459	71	102	67
13	411	104	497	88	497	76	111	72
14	442	112	535	94	535	82	119	78
15	474	120	574	101	574	88	128	83
16	506	128	612	108	612	94	137	89
17	537	136	650	114	650	100	145	94
18	569	144	688	121	688	106	154	100
19	600	152	726	128	726	112	162	105
20	632	160	765	135	765	118	171	111

Tabla A-5. Velocidad angular en un rango de  $N_{Re}$  [0-10] para 3.000 cP

3.000 cP	DHP		HP		HI		A-310	A-100
D [m]	0,0330	0,0655	0,0300	0,0715	0,0300	0,0765	0,0635	0,0787
$N_{Re}$	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]
1	188	48	227	40	227	35	51	33
2	375	95	454	80	454	70	101	67
3	563	143	681	120	681	105	152	100
4	750	190	908	160	908	140	203	133
5	938	238	1.135	200	1.135	175	253	167
6	1.126	286	1.362	240	1.362	209	304	200
<b>7</b>	<b>1.313</b>	<b>333</b>	<b>1.589</b>	<b>280</b>	<b>1.589</b>	<b>244</b>	<b>355</b>	<b>233</b>
8	1.501	381	1.816	320	1.816	279	405	267
9	1.689	429	2.043	360	2.043	314	456	300
10	1.876	476	2.270	400	2.270	349	507	333
11	2.064	524	2.497	440	2.497	384	557	367
12	2.251	571	2.724	480	2.724	419	608	400
13	2.439	619	2.951	520	2.951	454	659	433
<b>14</b>	<b>2.627</b>	<b>667</b>	<b>3.178</b>	<b>560</b>	<b>3.178</b>	<b>489</b>	<b>709</b>	<b>467</b>
15	2.814	714	3.405	600	3.405	524	760	500
16	3.002	762	3.632	639	3.632	559	811	533
17	3.190	810	3.859	679	3.859	594	861	567
18	3.377	857	4.086	719	4.086	628	912	600
19	3.565	905	4.313	759	4.313	663	963	633
20	3.752	952	4.541	799	4.541	698	1.013	667

Tabla A-6. Velocidad angular en un rango de  $N_{Re}$  [0-10] para 6.000 cP

6.000 cP	DHP		HP		HI		A-310	A-100
D [m]	0,0330	0,0655	0,0300	0,0715	0,0300	0,0765	0,0635	0,0787
$N_{Re}$	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]	N [rpm]
1	311	79	377	66	377	58	84	55
2	623	158	754	133	754	116	168	111
3	934	237	1.131	199	1.131	174	252	166
4	1.246	316	1.508	265	1.508	232	336	221
5	1.557	395	1.884	332	1.884	290	421	277
6	1.869	474	2.261	398	2.261	348	505	332
<b>7</b>	<b>2.180</b>	<b>553</b>	<b>2.638</b>	<b>464</b>	<b>2.638</b>	<b>406</b>	<b>589</b>	<b>387</b>
8	2.492	632	3.015	531	3.015	464	673	443
9	2.803	712	3.392	597	3.392	522	757	498
10	3.115	791	3.769	663	3.769	580	8.41	553
11	3.426	870	4.146	730	4.146	638	9.25	609
12	3.738	949	4.523	796	4.523	696	1.009	664
13	4.049	1.028	4.899	863	4.899	753	1.094	719
<b>14</b>	<b>4.361</b>	<b>1.107</b>	<b>5.276</b>	<b>929</b>	<b>5.276</b>	<b>811</b>	<b>1.178</b>	<b>775</b>
15	4.672	1.186	5.653	995	5.653	869	1.262	830
16	4.984	1.265	6.030	1.062	6.030	927	1.346	885
17	5.295	1.344	6.407	1.128	6.407	985	1.430	941
18	5.607	1.423	6.784	1.194	6.784	1.043	1.514	996
19	5.918	1.502	7.161	1.261	7.161	1.101	1.598	1.051
20	6.229	1.581	7.538	1.327	7.538	1.159	1.682	1.107

APÉNDICE B. Figuras y Gráficas

Figura B-1. Curvas de  $N_p$  vs.  $N_{Re}$  para diferentes turbinas. Tomada de Transport phenomena: a unified approach (p.376) por Brodkey y Hershey, 1988, Estados Unidos: McGraw-Hill Book Company.

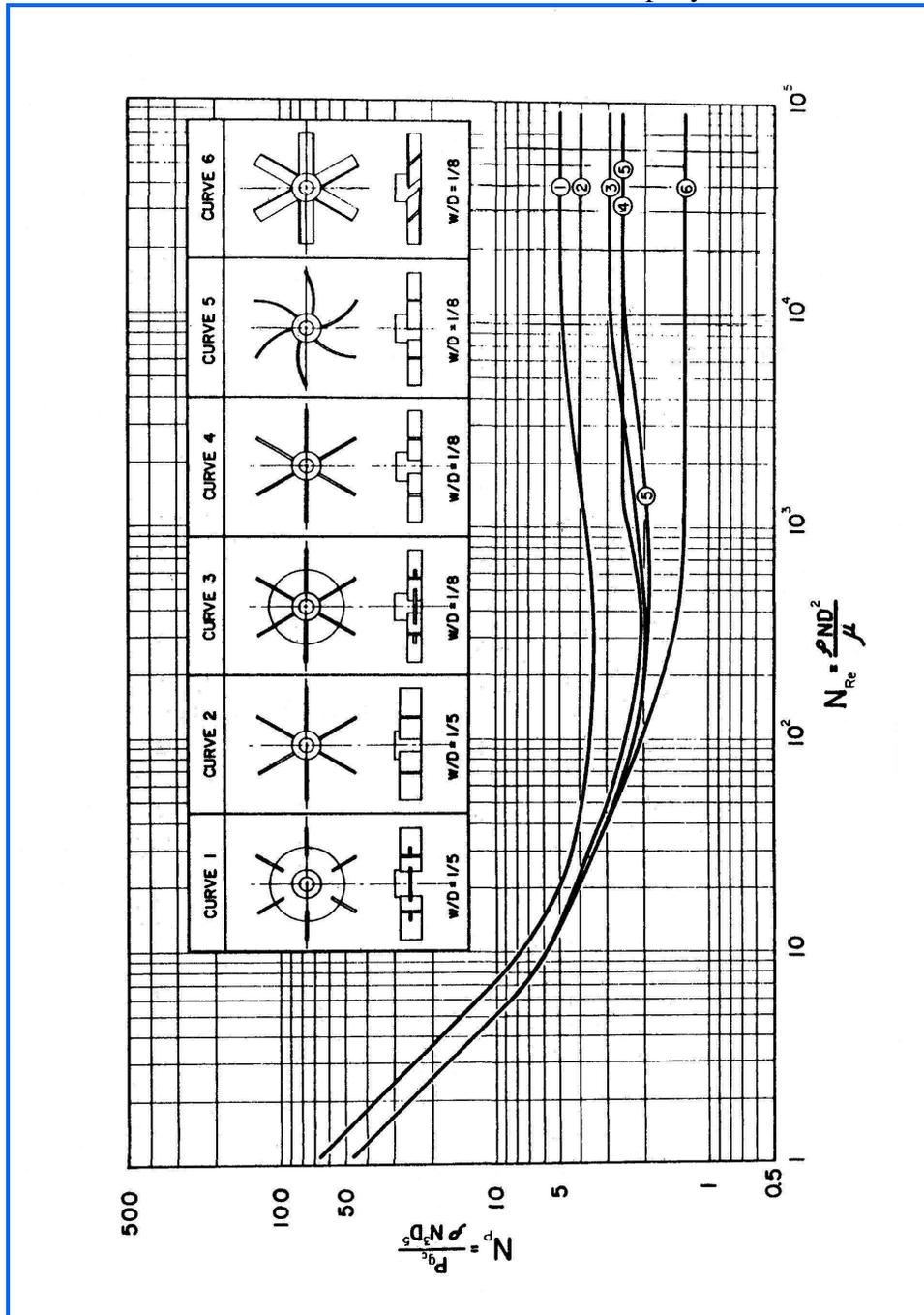


Figura B-2. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 500 cP

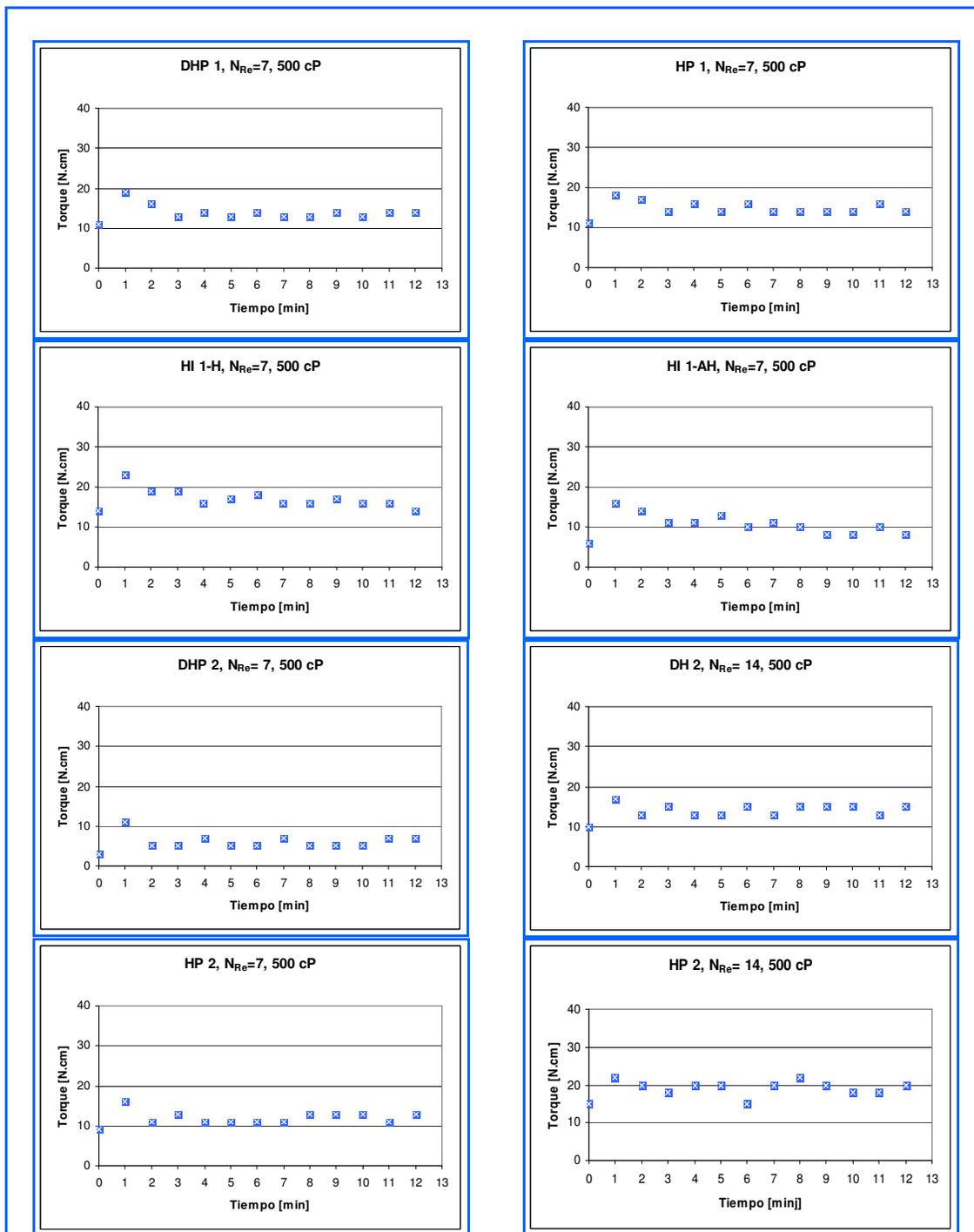


Figura B-3. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 500 cP

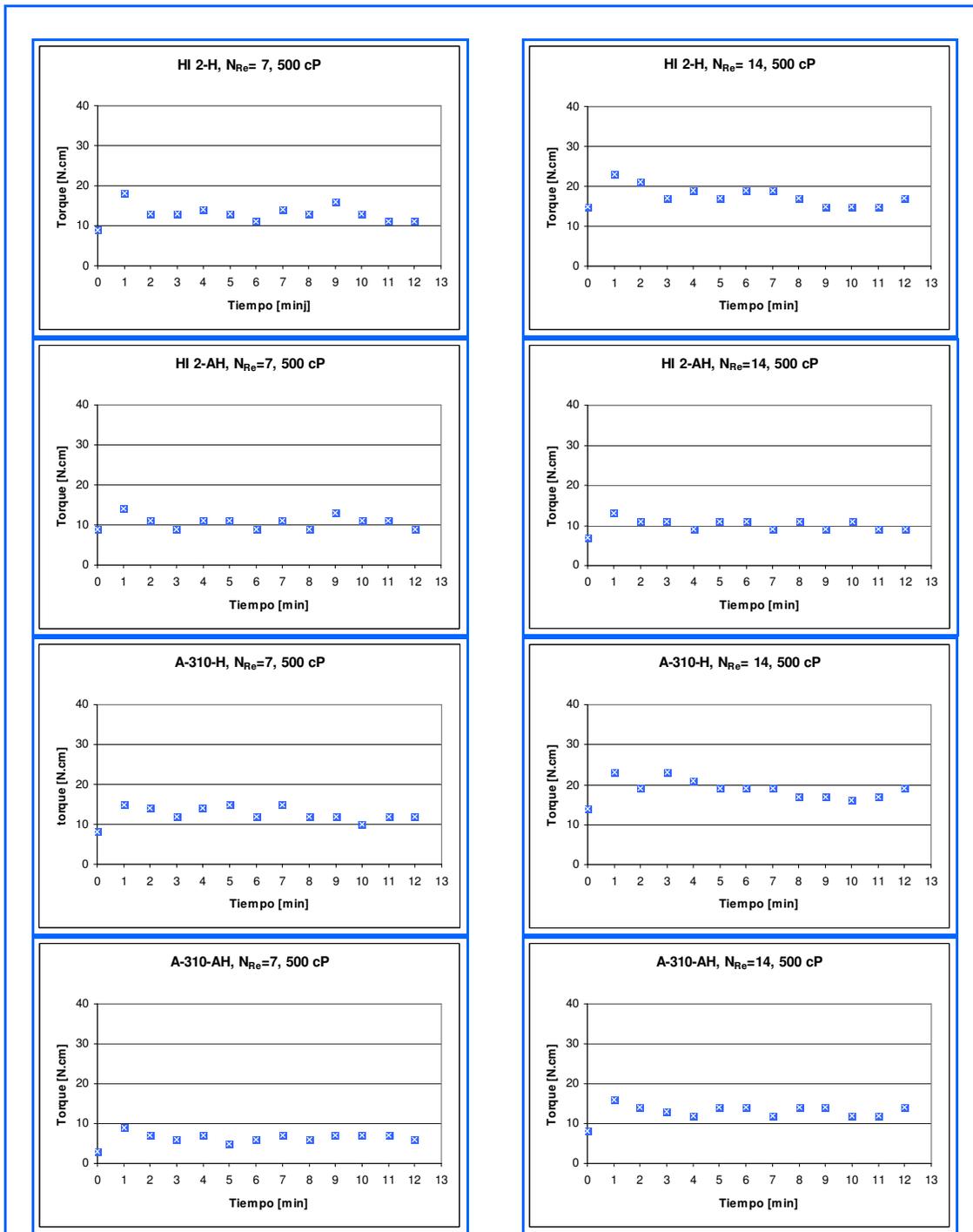


Figura B-4. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 500 cP

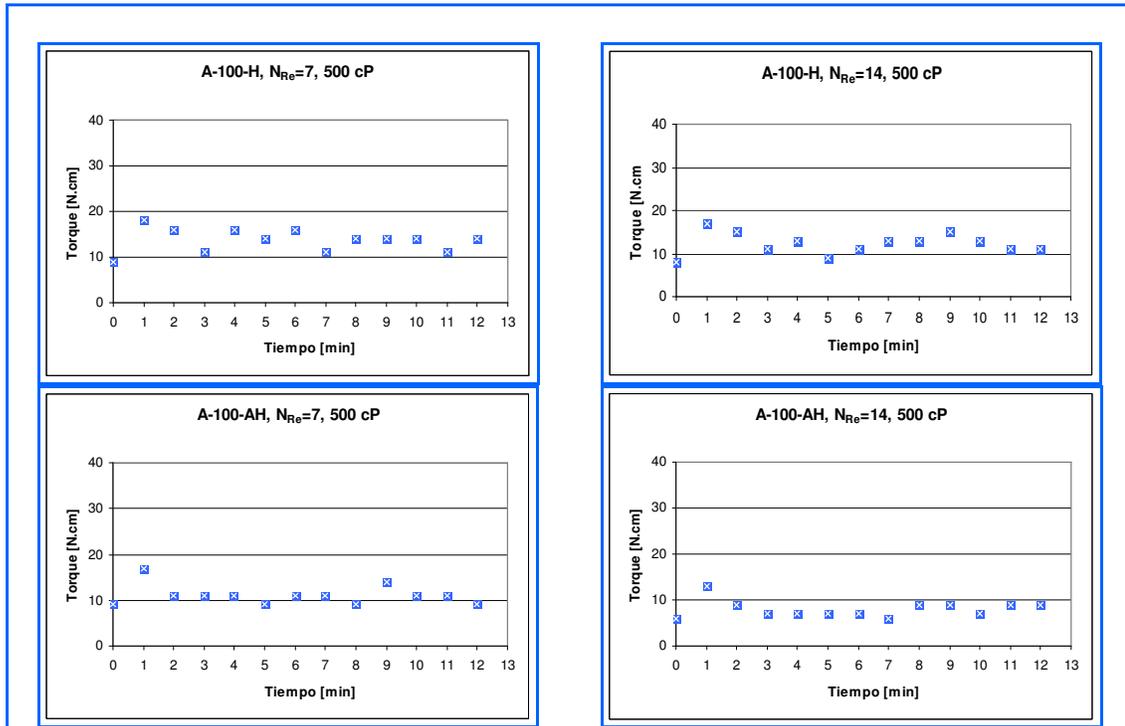


Figura B-5. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 3.000 Cp

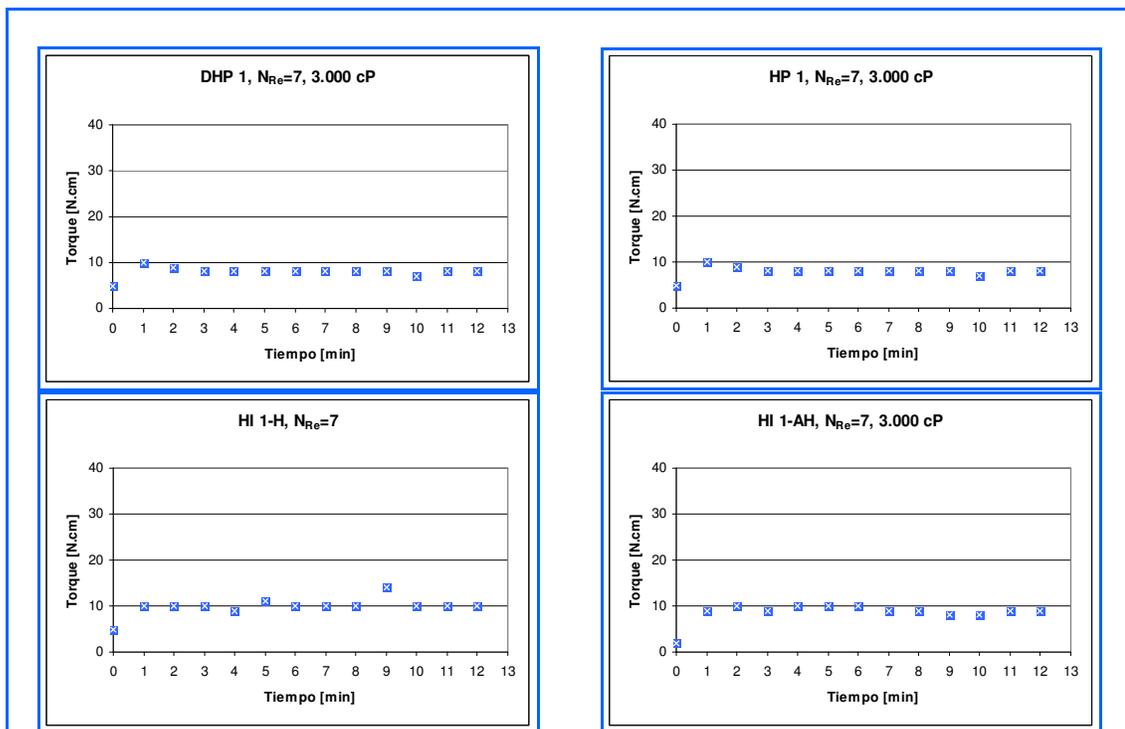


Figura B-6. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 3.000 cP

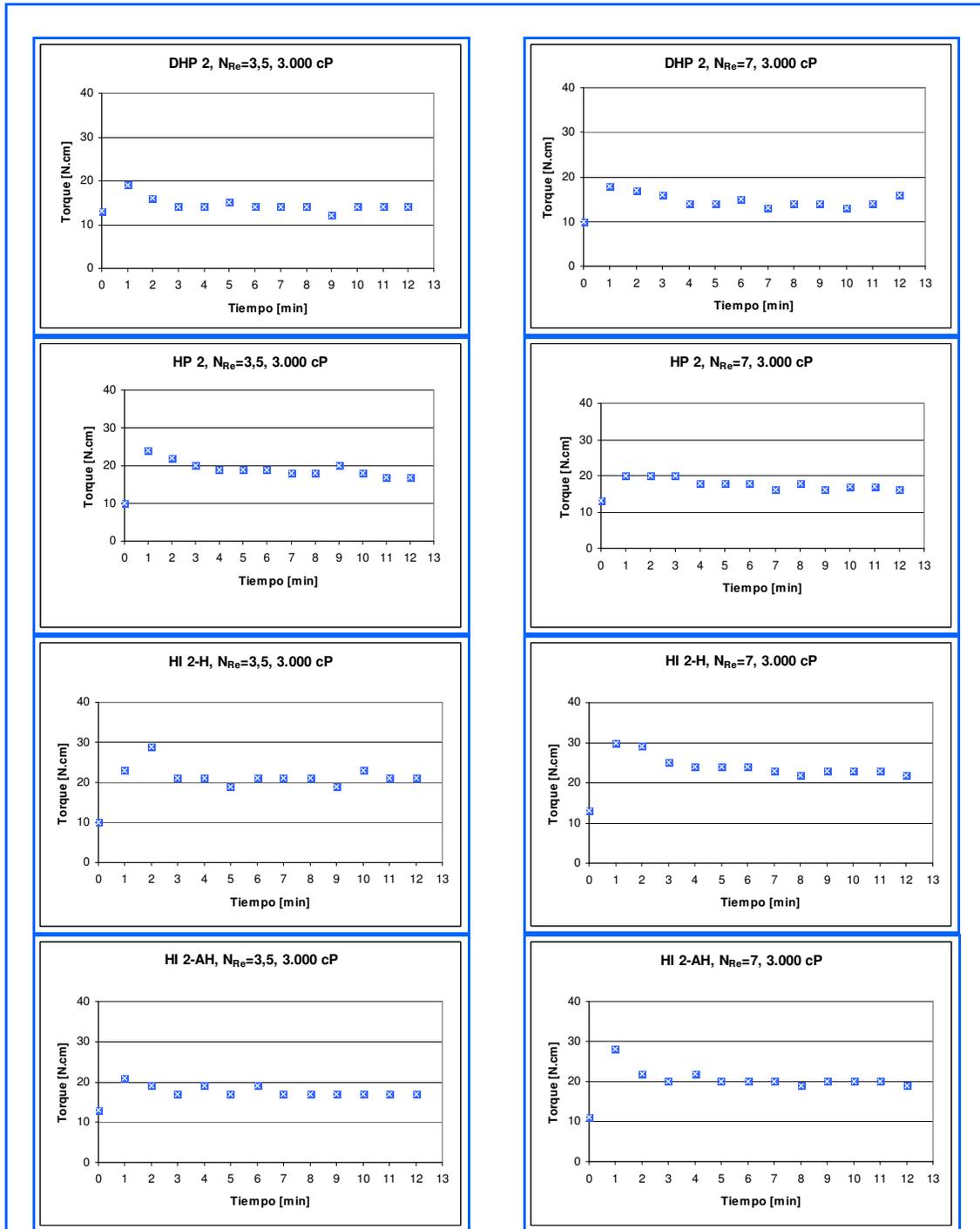


Figura B-7. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 3.000 cP

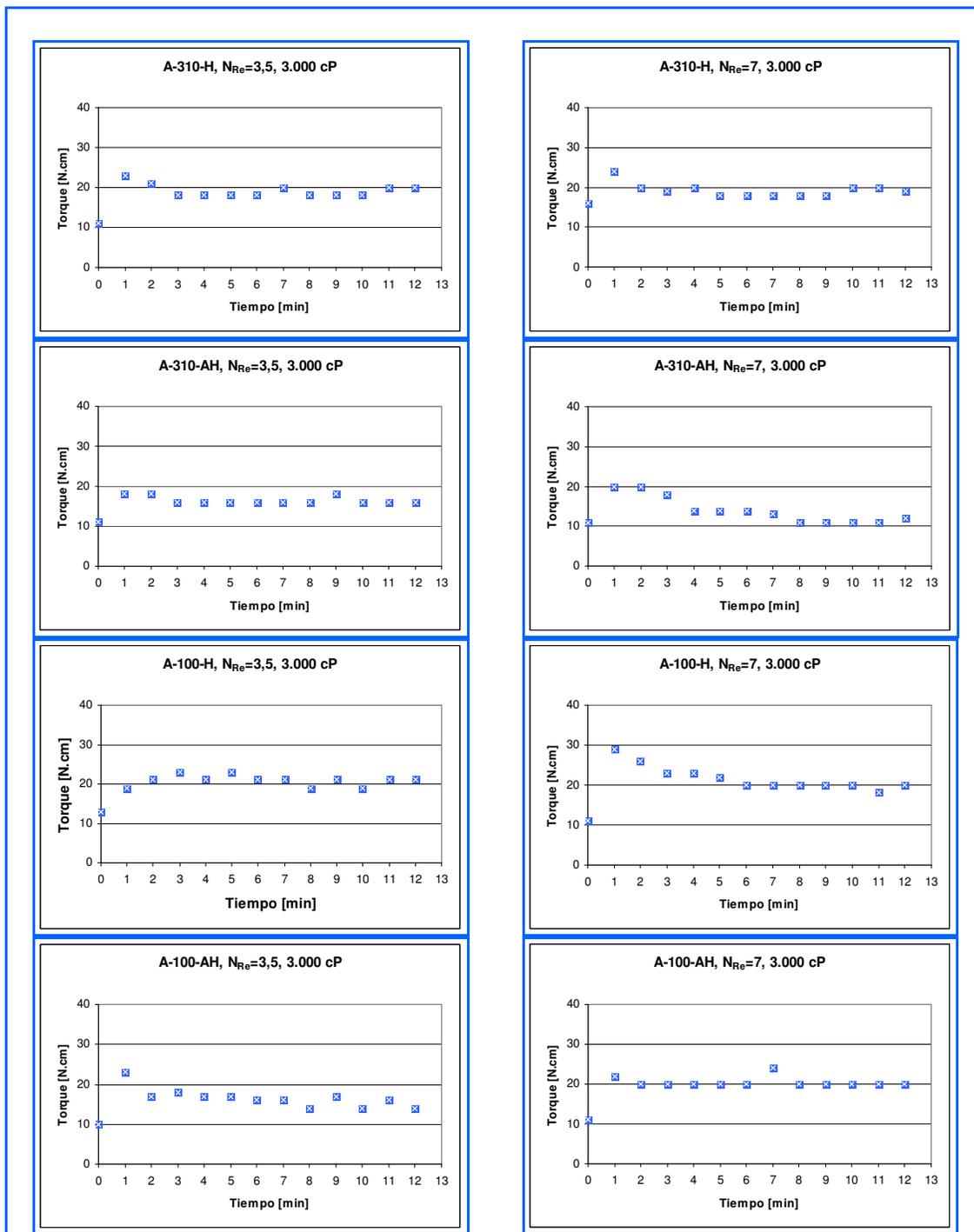


Figura B-8. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 3.000 cP

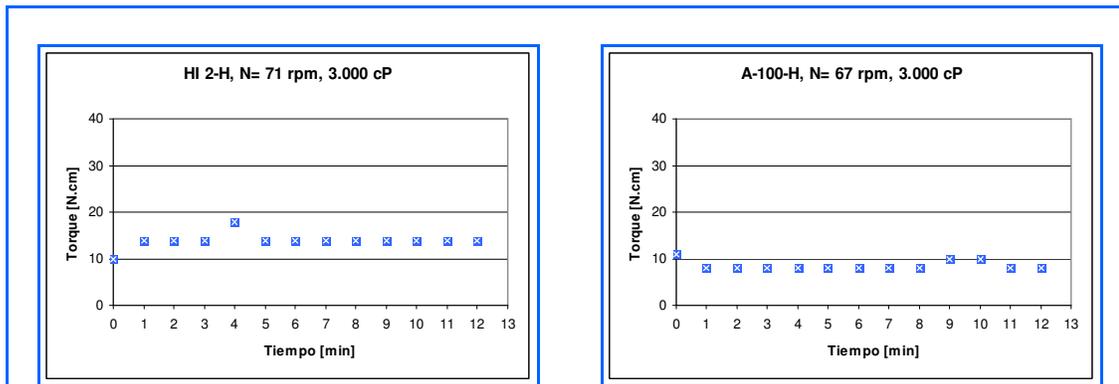


Figura B-9. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 6.000 cP

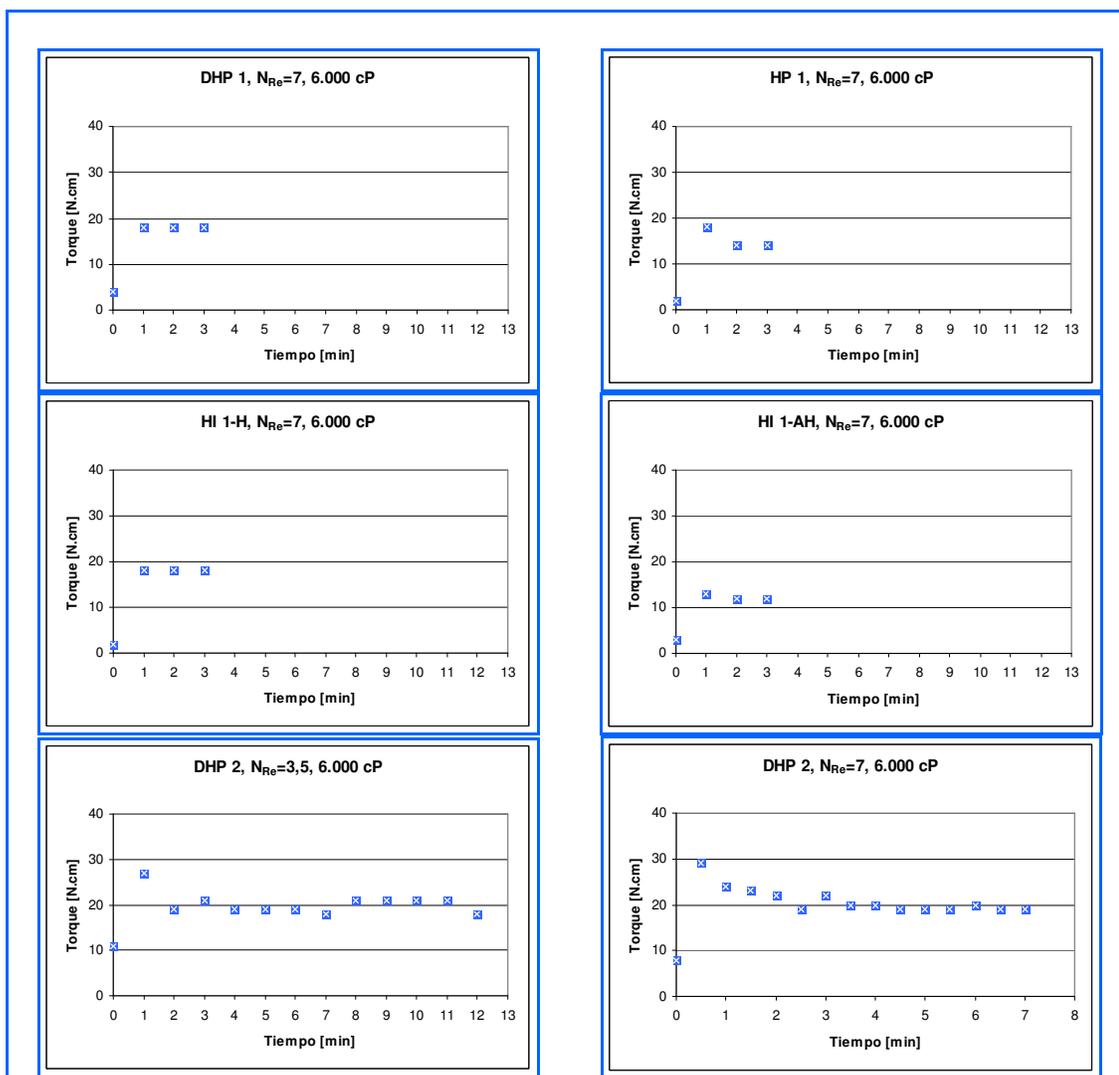


Figura B-10. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 6.000 cP

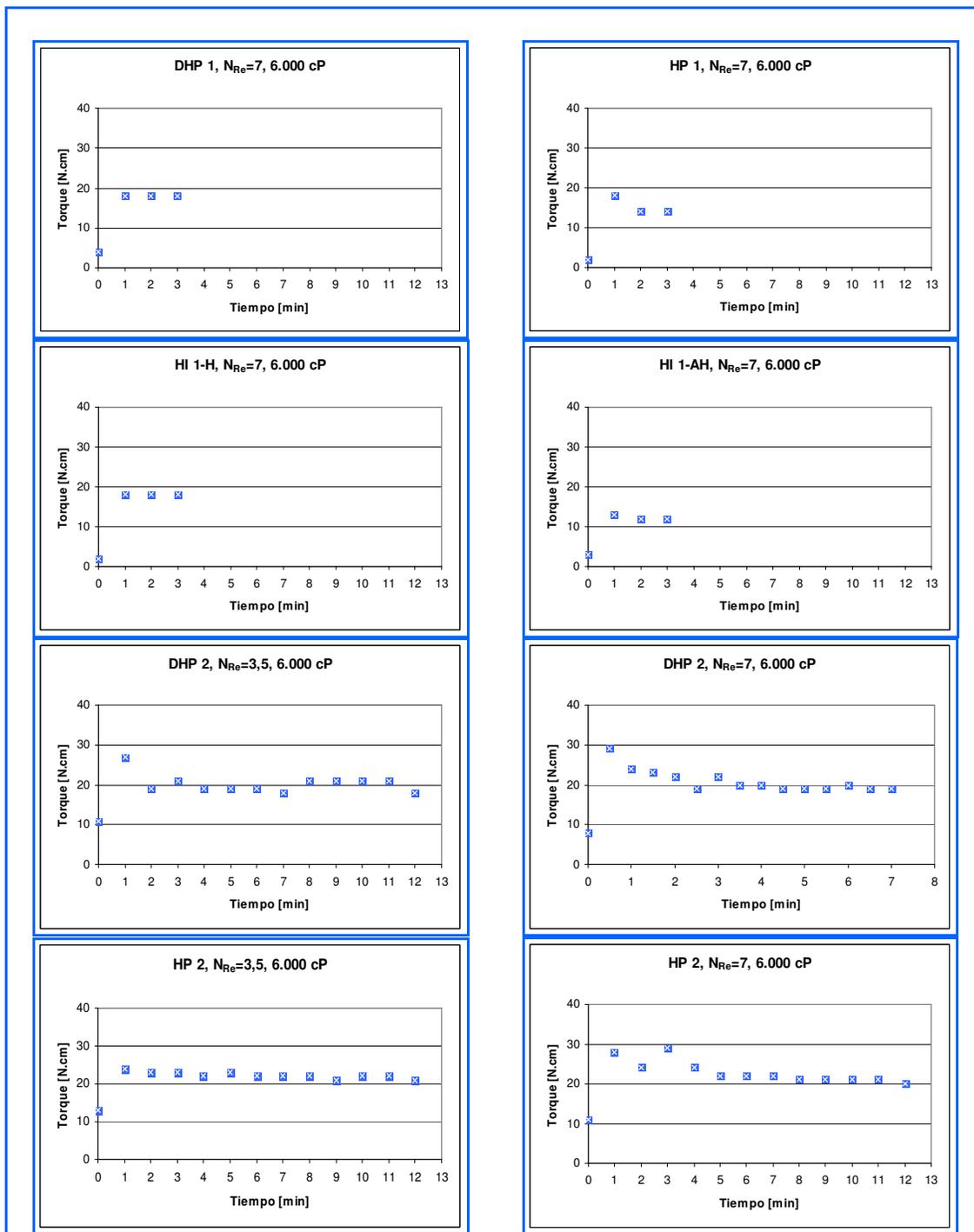


Figura B-11. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 6.000 cP

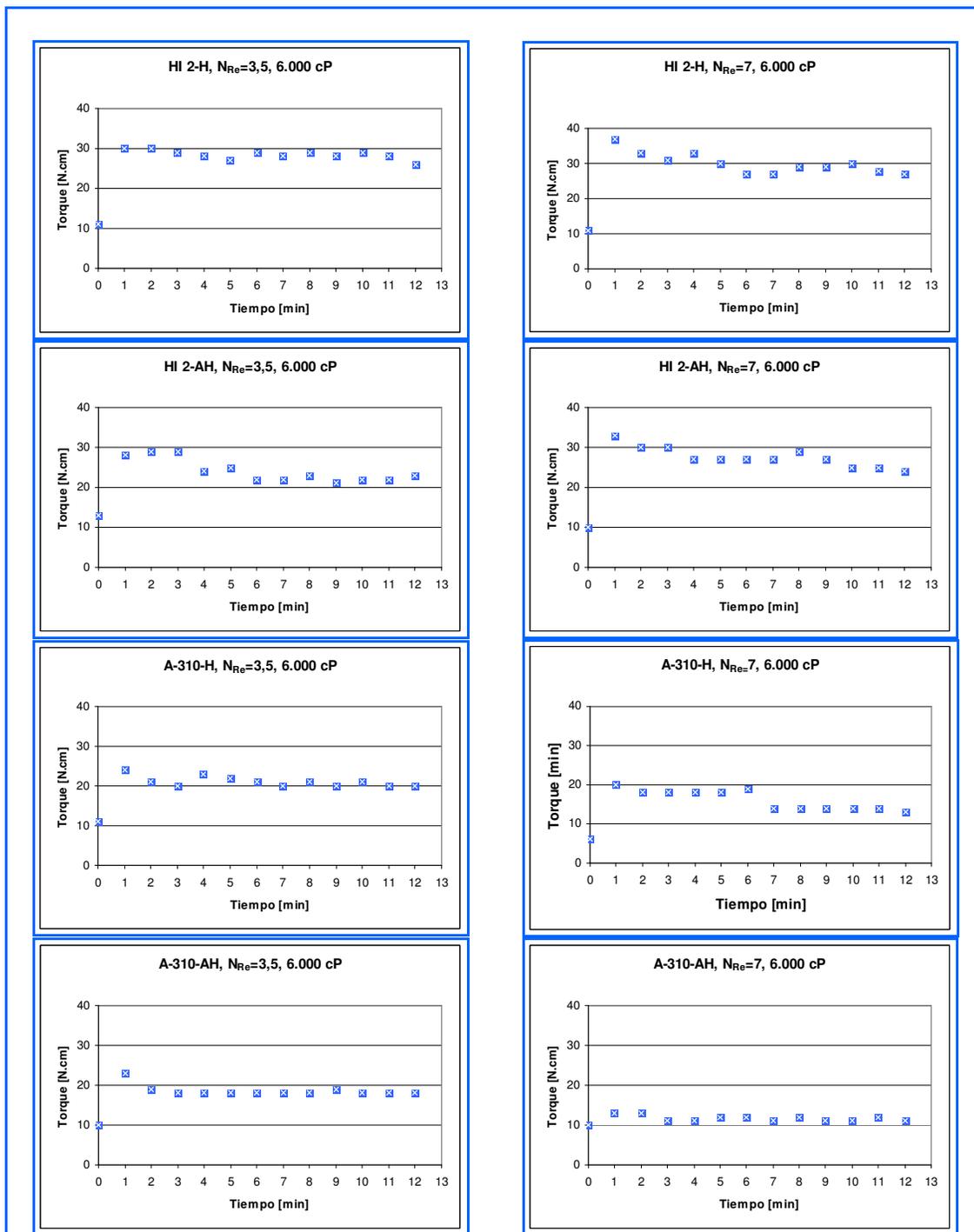
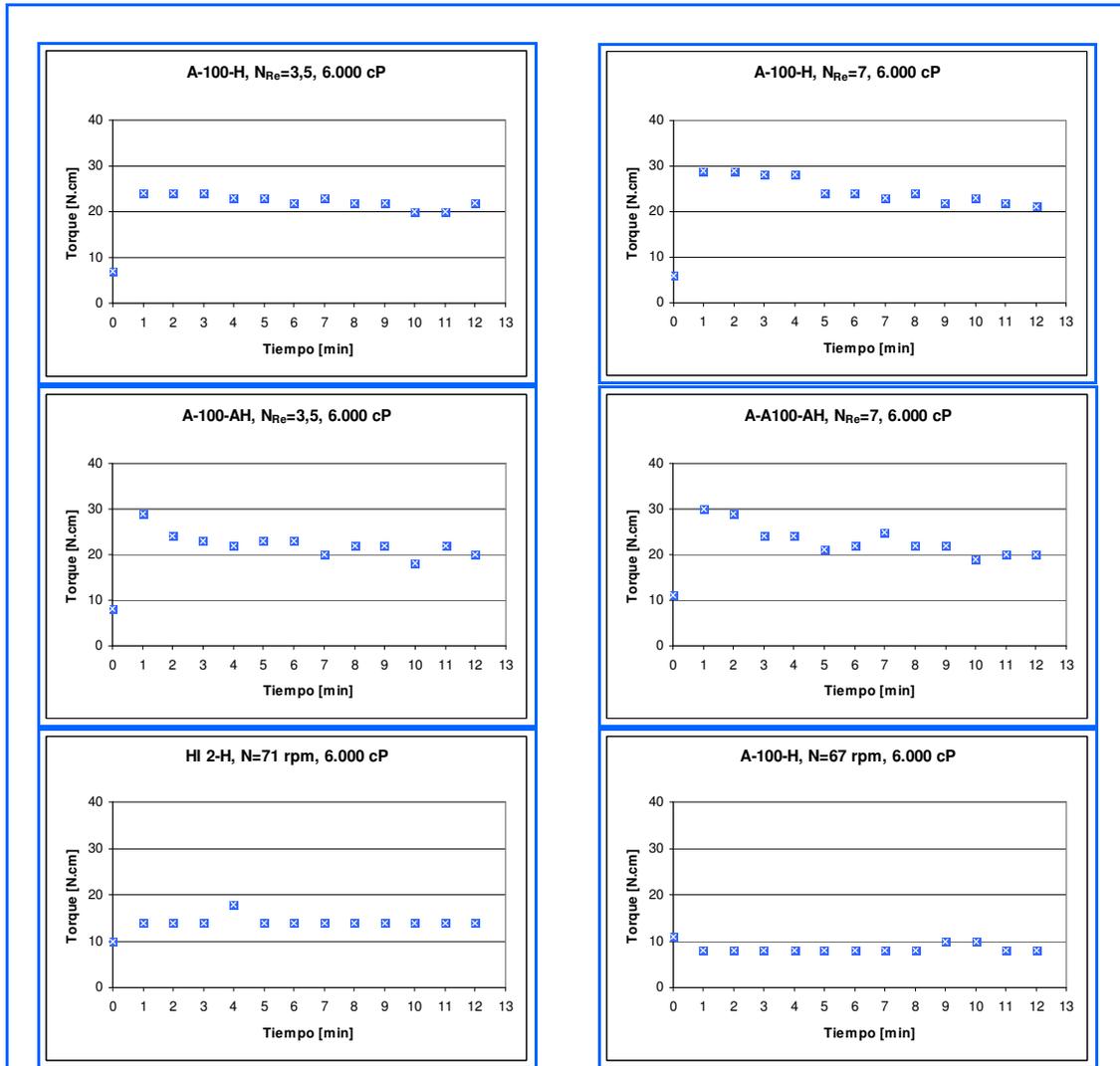


Figura B-12. Gráficas Torque vs. Tiempo. Fluido 6.000 cP



**APÉNDICE C. Planos**

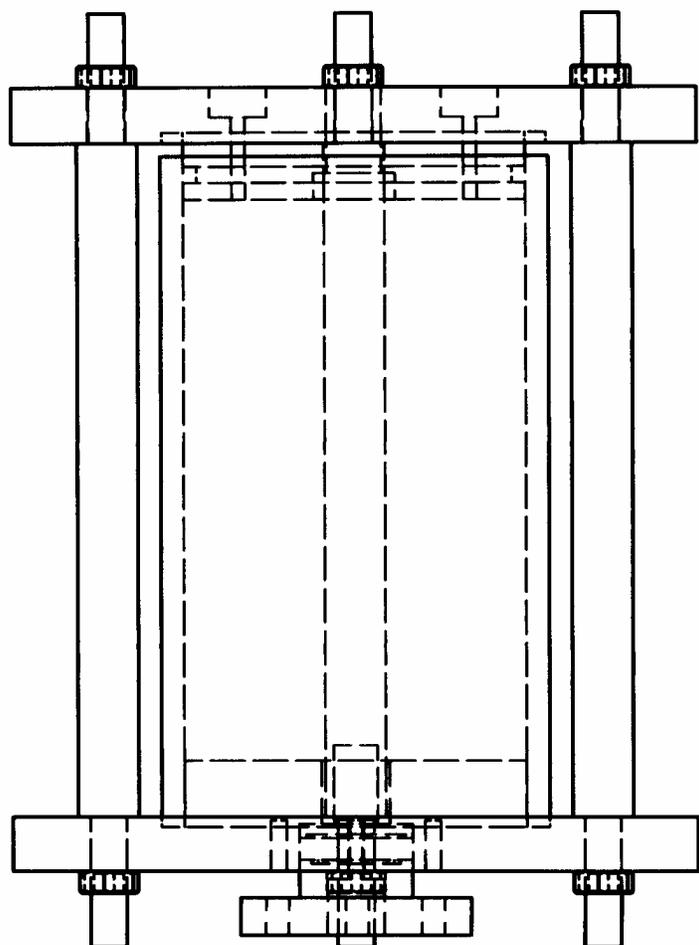
- Plano C-1. Ensamblaje del recipiente a presión
- Plano C-2. Despiece del recipiente a presión.
- Plano C-3. Celda del recipiente a presión.
- Plano C-4. Barra soporte del recipiente a presión.
- Plano C-5. Tapa superior del recipiente a presión.
- Plano C-6. Tapa inferior del recipiente a presión.
- Plano C-7. Burbujeador del recipiente a presión.
- Plano C-8. Base del burbujeador del recipiente a presión.
- Plano C-9. Impulsor de hojas planas ( $D/T=1/3$ ).
- Plano C-10. Impulsor de hojas planas ( $D/T=0,85$ ).
- Plano C-11. Impulsor de disco de hojas planas ( $D/T=1/3$ ).
- Plano C-12. Impulsor de disco de hojas planas ( $D/T=0,85$ ).
- Plano C-13. Impulsor de hojas inclinadas ( $D/T=1/3$ ).
- Plano C-14. Impulsor de hojas inclinadas ( $D/T=0,85$ ).
- Plano C-15. Recipiente antidistorsión.
- Plano C-16. Ensamblaje de la base del recipiente a presión.
- Plano C-17. Base del recipiente a presión.

2

1

B

B



A

A

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-1

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Ensamblaje del recipiente a  
presión

Escala: 1:2

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

2



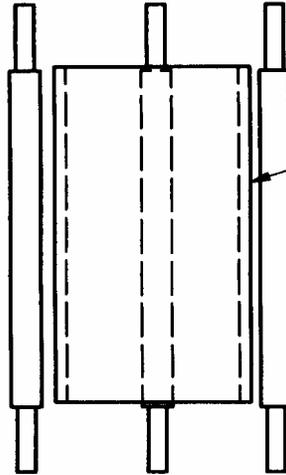
1

2

1



3



1

2



4



5



6

A

6	Base del burbujeador del recipiente a presión	1	Acero inoxidable 316	Lleva 1 O-ring y 3 pernos M5x0.8x20
5	Burbujeador del recipiente a presión	1	Acero inoxidable 316	Lleva 1 O-ring en su soporte
4	Tapa inferior del recipiente a presión	1	Acero inoxidable 316	Lleva 2 O-ring
3	Tapa superior del recipiente a presión	1	Acero inoxidable 316	Lleva 2 O-ring y 1 estopera
2	Barra soporte del recipiente a presión	3	Acero inoxidable 316	Lleva 2 tuercas hexagonales 3/8 UNC
1	Celda del recipiente a presión	1	Acrílico	
Nº	Descripción	Cant.	Material	Comentario

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-2

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Despiece del recipiente a presión

Escala: 1:4

Unidades: mm

Fecha:  
05/12/2006

2



1

B

A

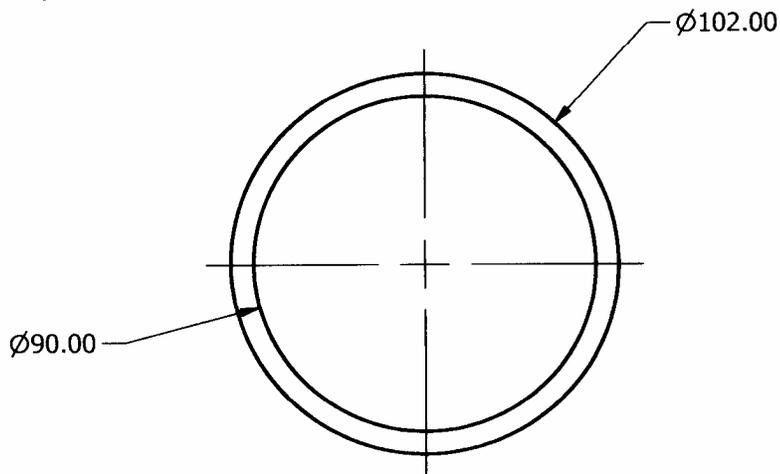
A

2

1

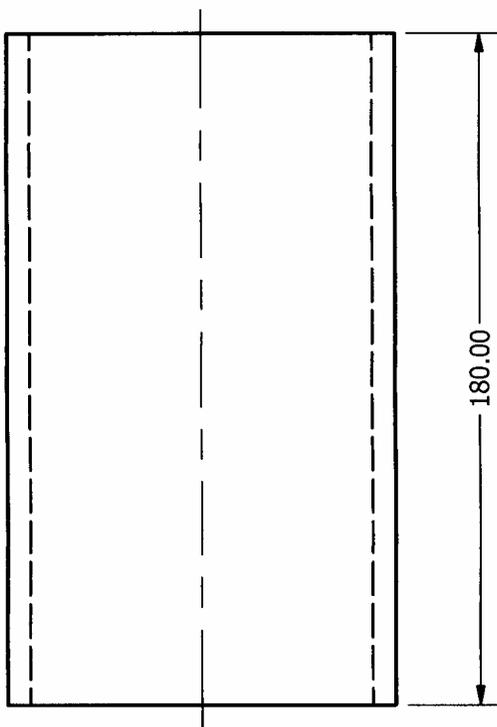
B

B



A

A



A

A

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-3

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Celda del recipiente a presión

Escala: 1:2

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

2



1

2

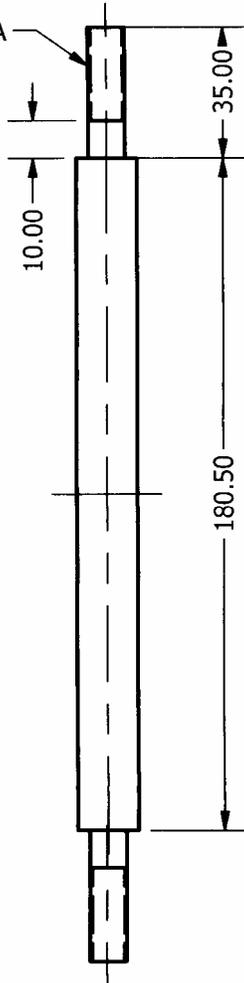
1

(5/8 in)  $\varnothing 15.88$



$\varnothing 9.53$  (3/8 in)

3/8-16 UNC - 1A



B

B

A

A

A

A

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-4

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Barra soporte del recipiente a  
presión

Escala: 1:2

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

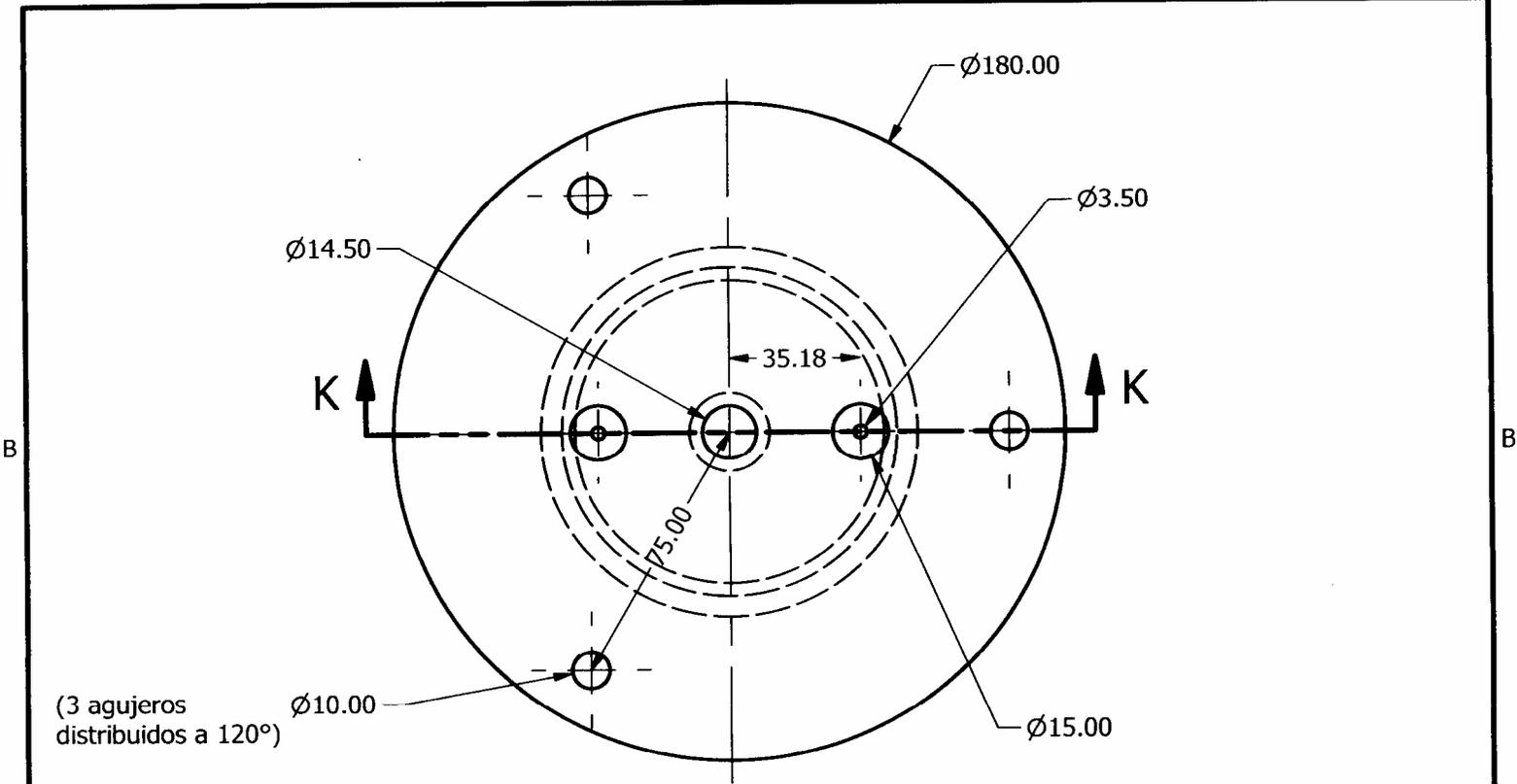
2



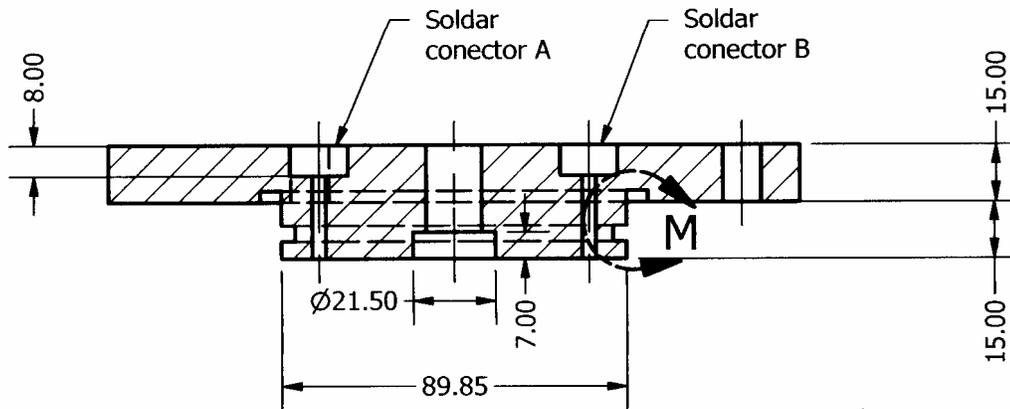
1

2

1



(3 agujeros distribuidos a  $120^\circ$ )



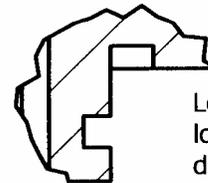
SECTION K-K



Conector A



Conector B



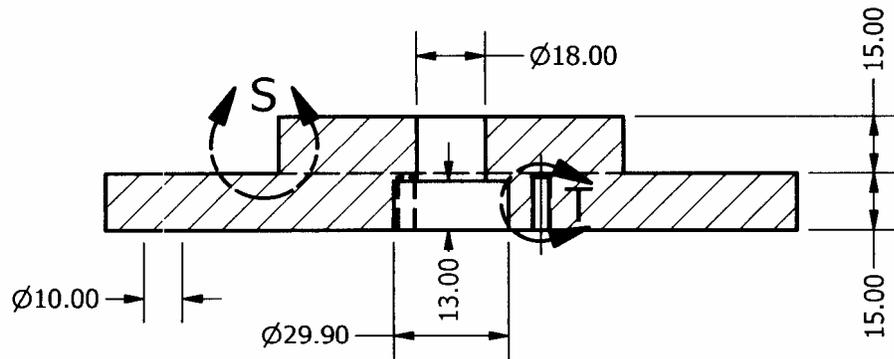
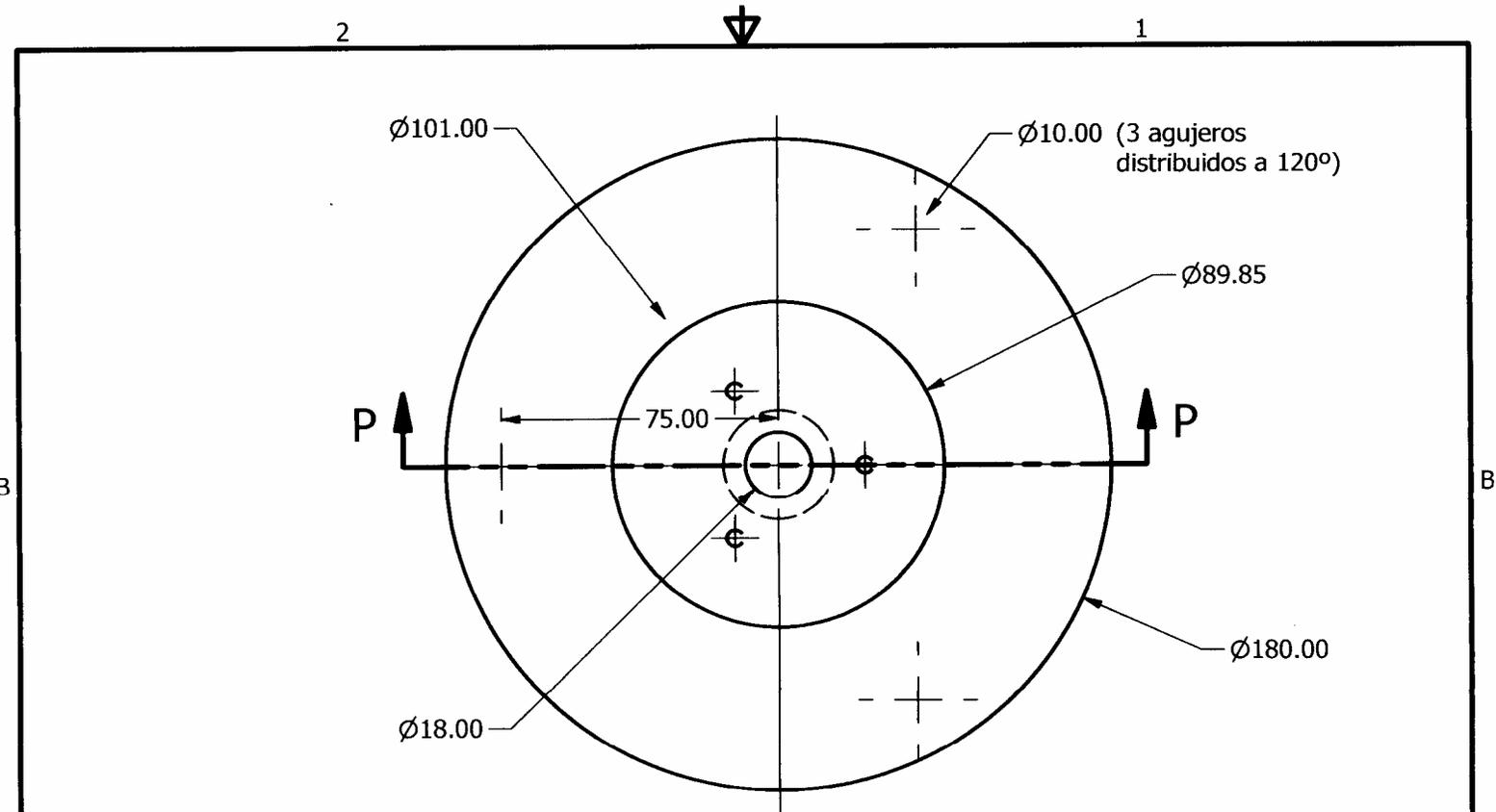
Los alojamientos de los O-ring quedan dimensionados por el taller mecánico

DETAIL M  
SCALE 1 : 1

Diseñado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica	Plano: C-5	Revisado por: Enrique Limongi
		Escala: 1:2	Unidades: mm
Dibujado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Tapa superior del recipiente a presión	Fecha: 04/12/2006	

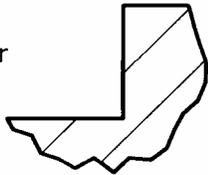
2

1

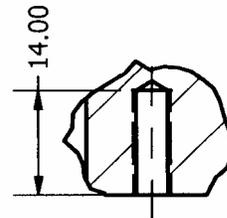


SECTION P-P

Los alojamientos de los O-ring quedan dimensionados por el taller mecánico



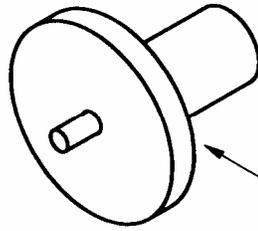
DETAIL S  
SCALE 1 : 1



3 agujeros con rosca M5x0.8 - 6H, distribuidos a  $120^\circ$

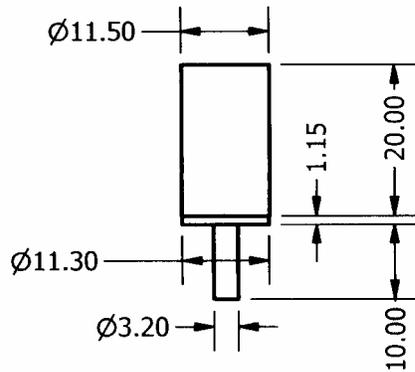
DETAIL T  
SCALE 1 : 1

Diseñado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica	Plano: C-6	Revisado por: Enrique Limongi
		Escala: 1:2	Unidades: mm
Dibujado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Tapa inferior del recipiente a presión	Fecha: 04/12/2006	

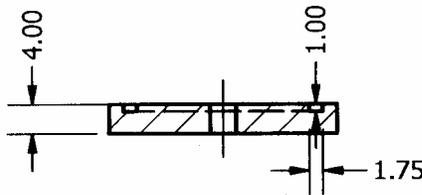
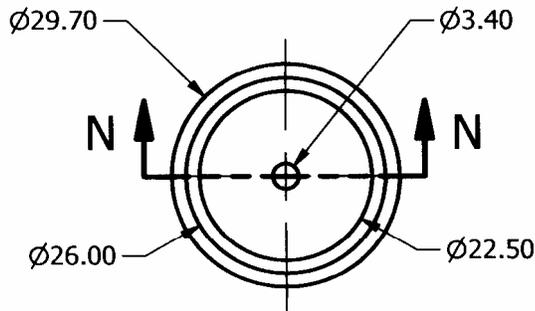


Soldar burbujeador al disco del burbujeador

Burbujeador



Disco del burbujeador



SECTION N-N

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-7

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Burbujeador del recipiente a presión

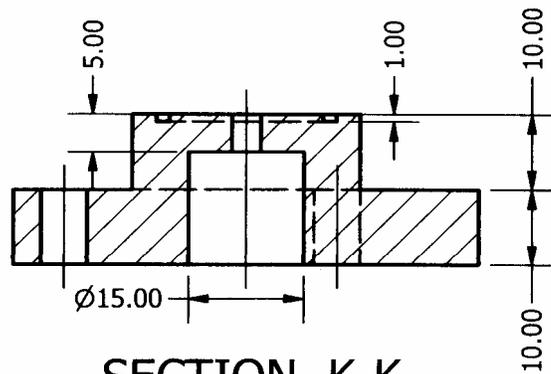
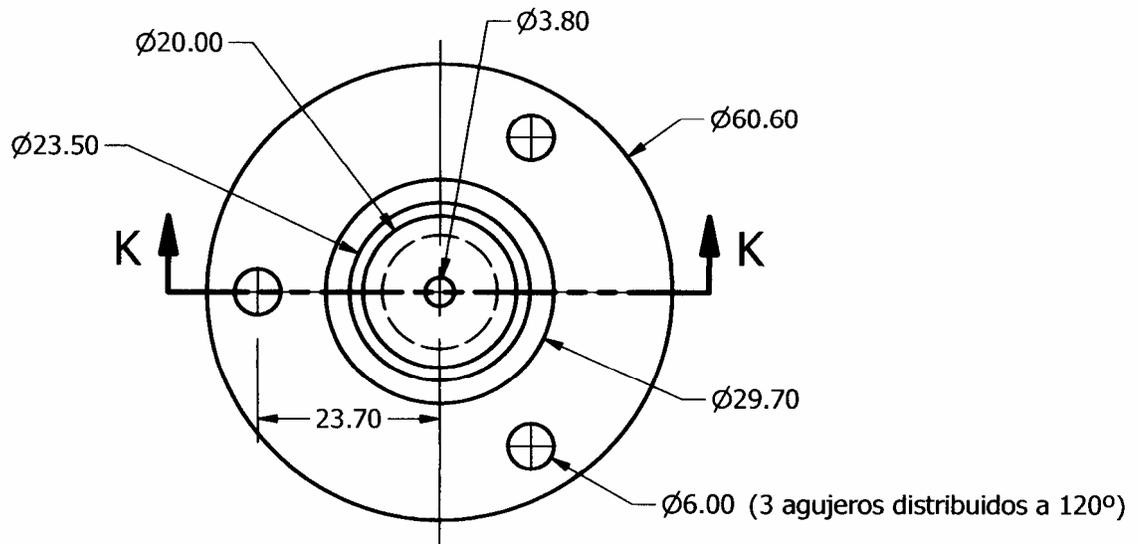
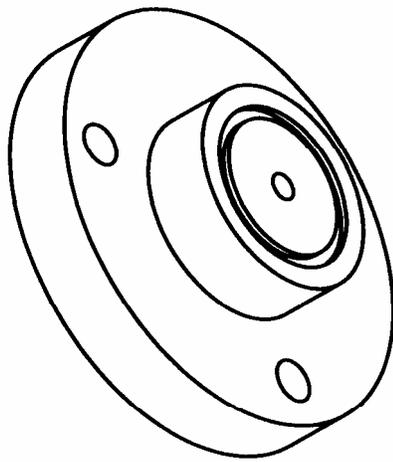
Escala: 1:1

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

2

1



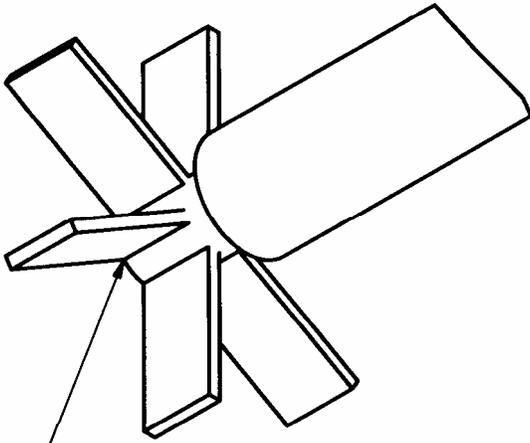
SECTION K-K

Diseñado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica	Plano: C-8	Revisado por: Enrique Limongi
Dibujado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Base del burbujeador del recipiente a presión	Escala: 1:2	Unidades: mm
		Fecha: 04/12/2006	

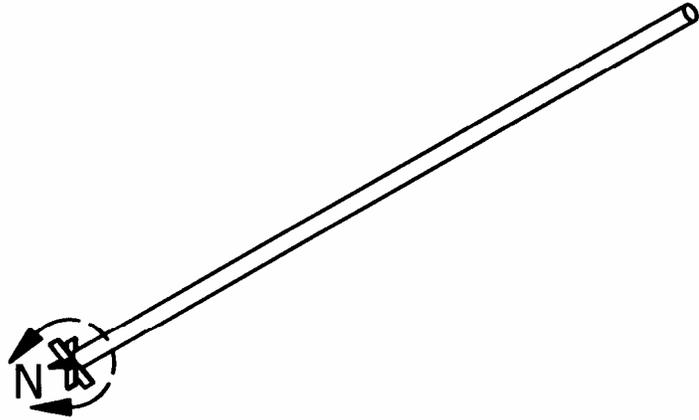
2

1

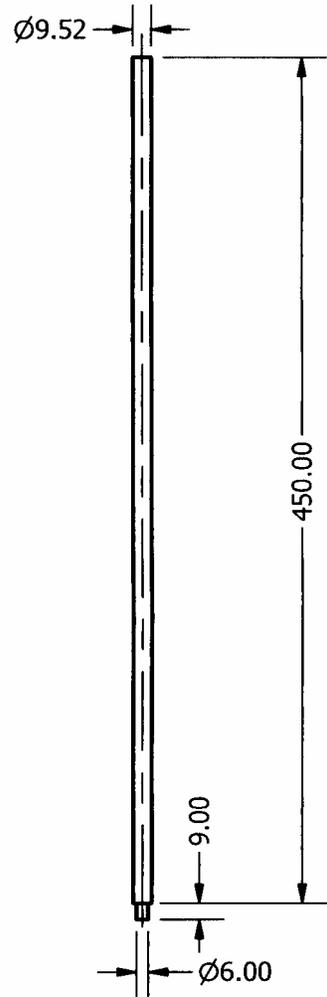
DETAIL N  
SCALE 2 : 1



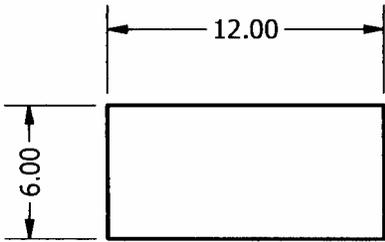
Soldar las hojas al raz de la cara menor del eje



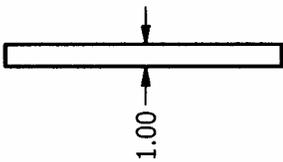
(3/8 in) Eje



Hojas (6)



SCALE 3 : 1



SCALE 3 : 1

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-9

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

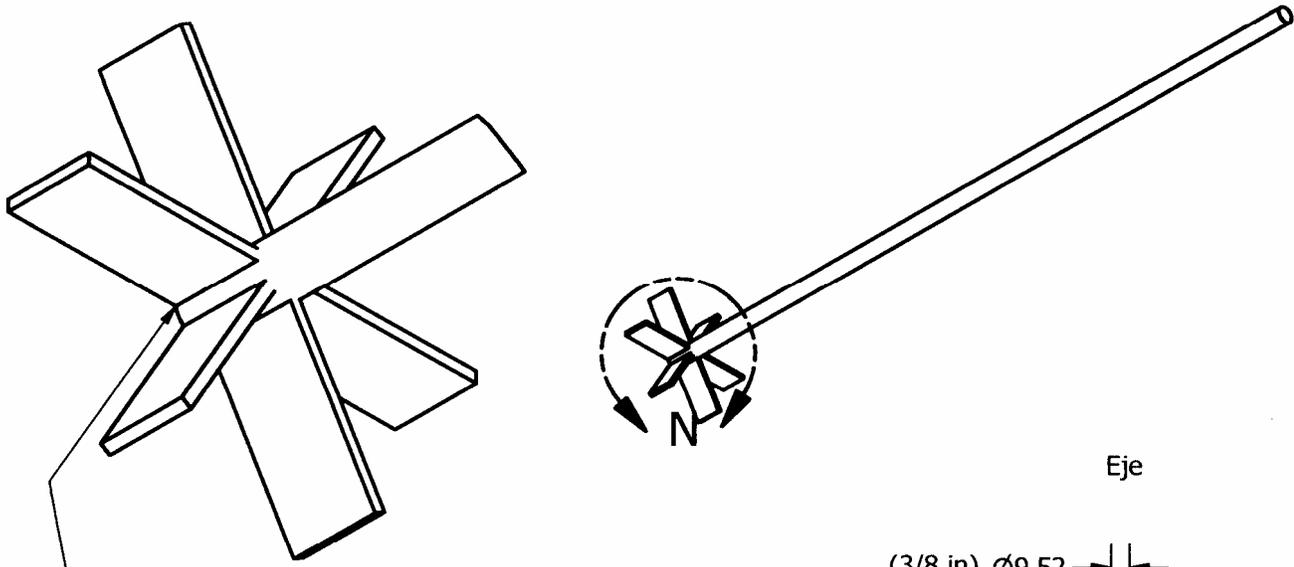
Impulsor de hojas planas  
(D/T=1/3)

Escala: 1:4

Unidades: mm

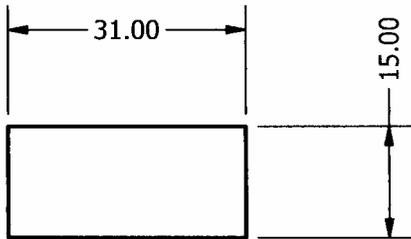
Fecha:  
04/12/2006

DETAIL N  
SCALE 1 : 1

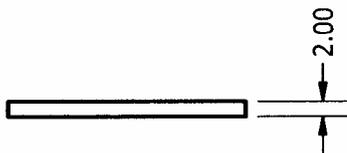


Soldar las hojas al raz de la cara del eje

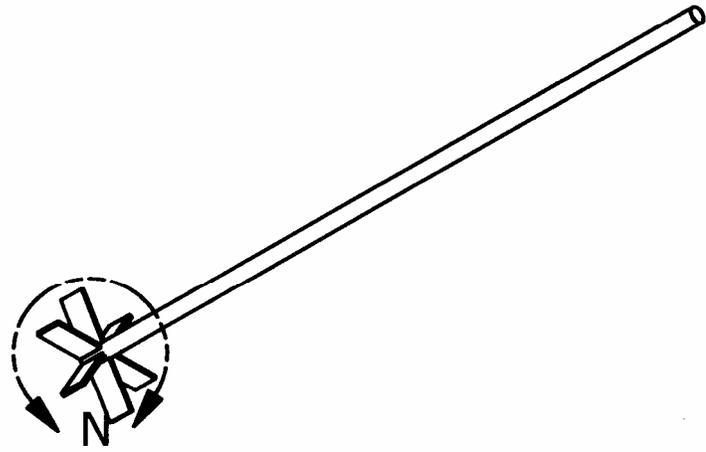
Hojas (6)



SCALE 1 : 1



SCALE 1 : 1



Eje

(3/8 in) Ø9.52

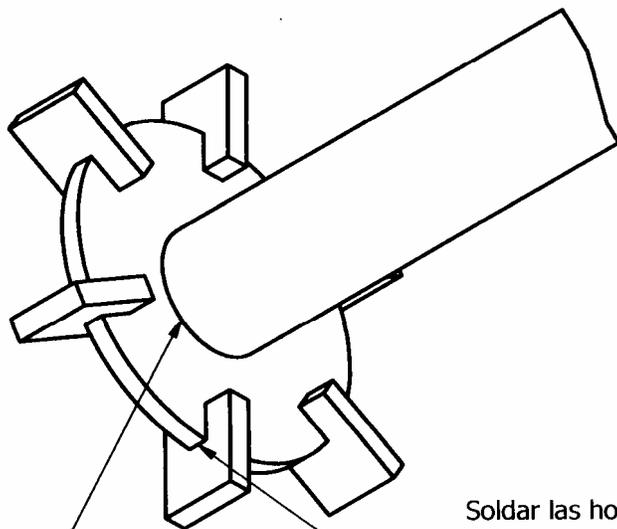
450.00

Diseñado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica	Plano: C-10	Revisado por: Enrique Limongi
Dibujado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Impulsor de disco de hojas planas (D/T=0,85)	Escala: 1:4	Unidades: mm
		Fecha: 04/12/2006	

2

1

# DETAIL P SCALE 2 : 1



Soldar la cara del eje a la cara del disco

Soldar las hojas a las ranuras del disco, a la mitad de la altura de las hojas

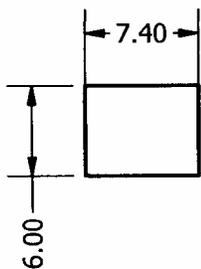


Eje

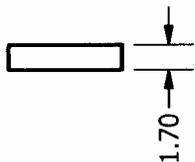
(3/8 in)  $\varnothing 9.52$

450.00

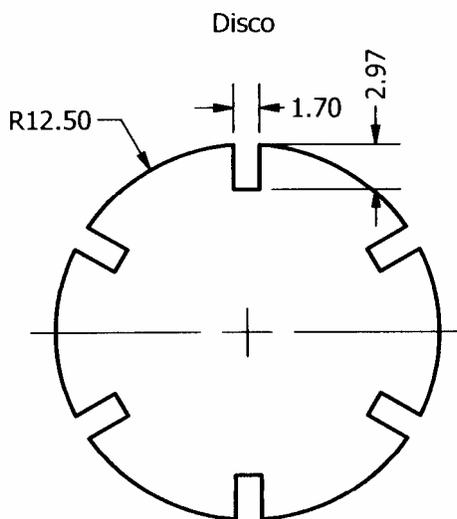
Hojas (6)



SCALE 2 : 1



SCALE 2 : 1



SCALE 2 : 1



SCALE 2 : 1

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-11

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Impulsor de disco de hojas planas  
(D/T=1/3)

Escala: 1:4

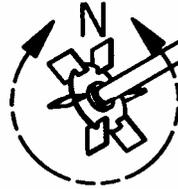
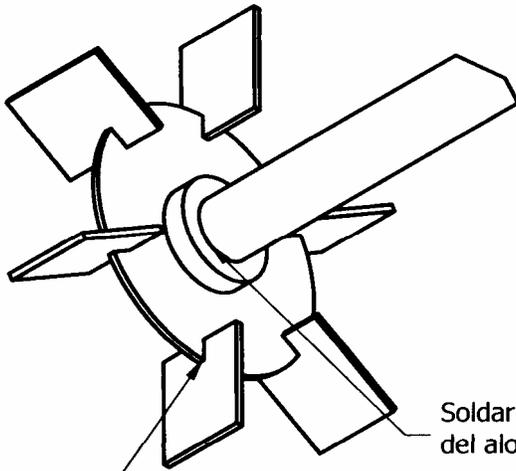
Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

2

1

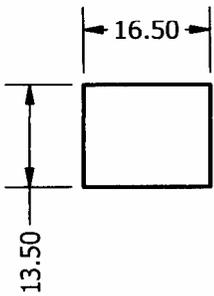
DETAIL N  
SCALE 1 : 1



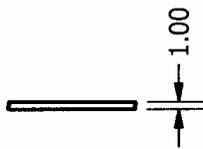
Soldar las hojas a las ranuras del disco, a la mitad de la altura de las hojas

Soldar la cara del eje dentro del alojamiento del disco

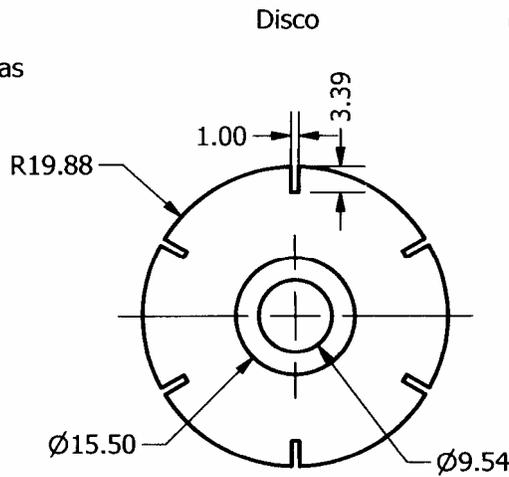
Hojas (6)



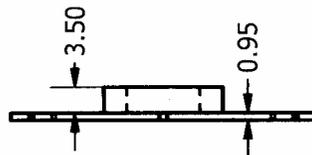
SCALE 1 : 1



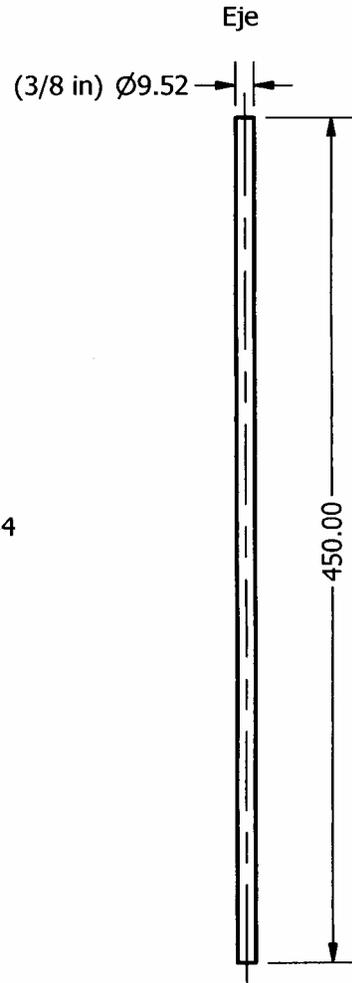
SCALE 1 : 1



SCALE 1 : 1



SCALE 1 : 1



Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-12

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

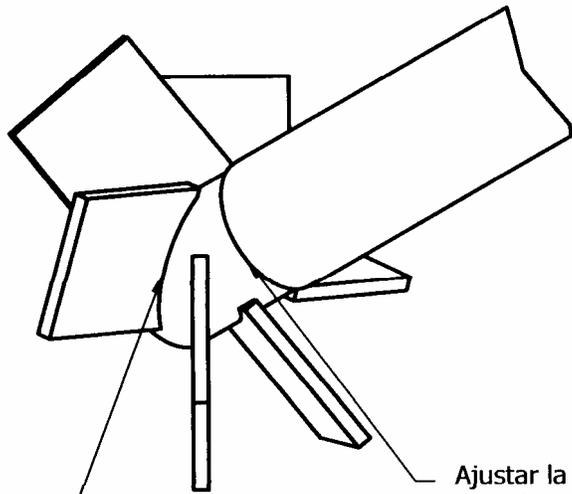
Impulsor de disco de hojas planas  
(D/T=0,85)

Escala: 1:4

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

### DETAIL P SCALE 2 : 1



Soldar las hojas a las ranuras de la base

Ajustar la punta del eje dentro de la base



Eje  
Ø9.52 (3/8 in)

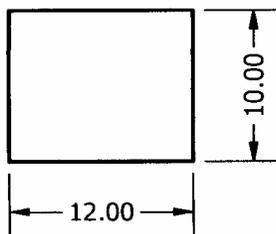
445.00



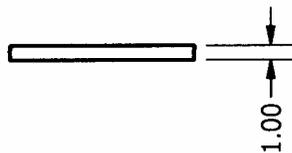
4.00

### DETAIL R SCALE 1 : 1

Hojas (6)

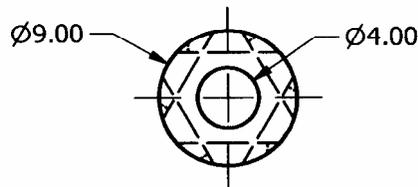


SCALE 2 : 1

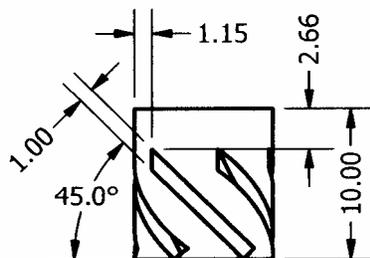


SCALE 2 : 1

Base



SCALE 2 : 1



SCALE 2 : 1

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-13

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

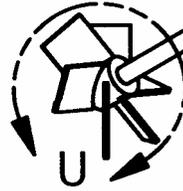
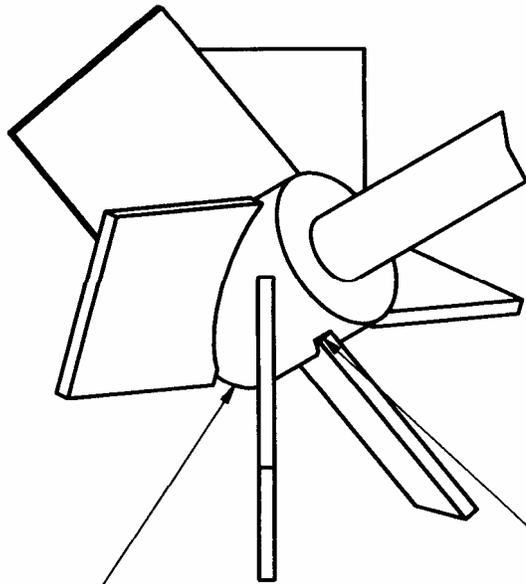
Impulsor de hojas inclinadas  
(D/T=1/3)

Escala: 1:4

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

DETAIL U  
SCALE 1 : 1



Soldar las hojas a las ranuras de la base

Soldar la cara inferior del eje a la cara inferior de la base

Eje

$\varnothing 9.52$  (3/8 in)

450.00

Hojas (6)

31.25

26.00

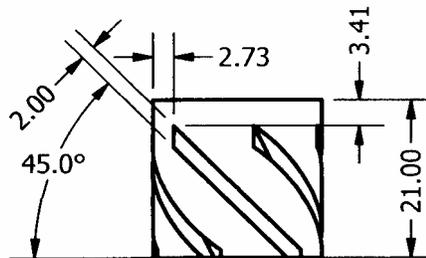
Base

$\varnothing 9.52$

$\varnothing 22.00$

SCALE 1 : 1

SCALE 1 : 1



SCALE 1 : 1

2.15

SCALE 1 : 1

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-14

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Impulsor de hojas inclinadas  
(D/T=0,85)

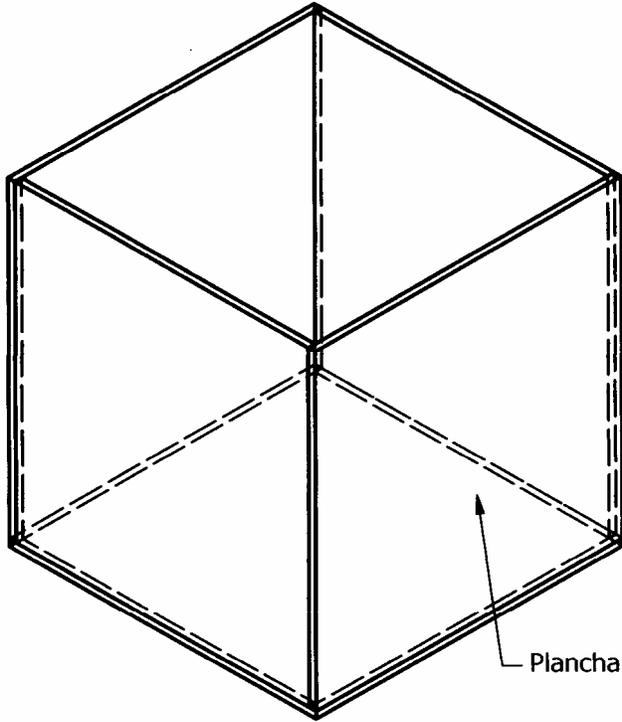
Escala: 1:4

Unidades: mm

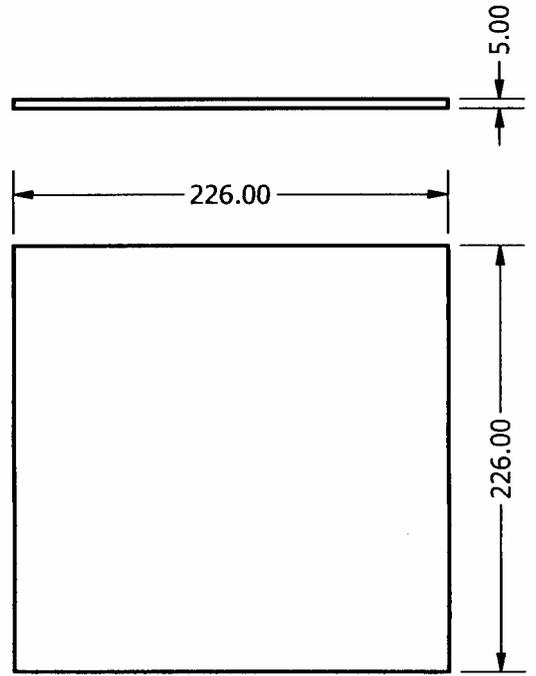
Fecha:  
04/12/2006

2

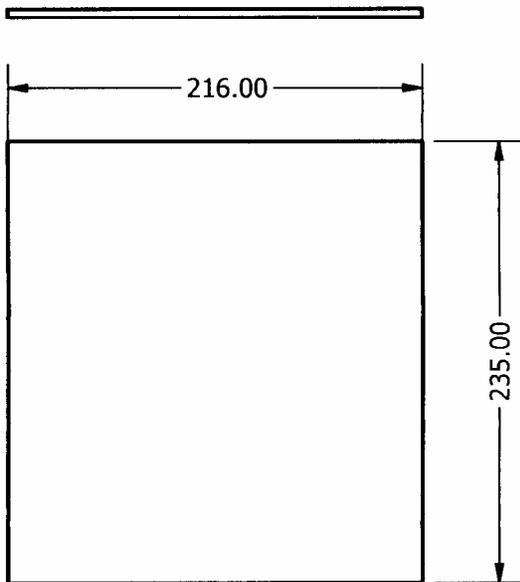
1



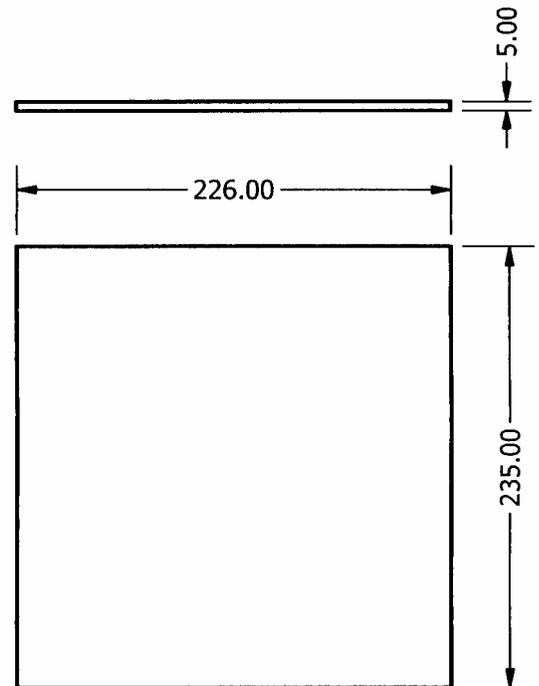
Plancha frontal



Plancha base



Plancha lateral (2)



Plancha frontal (2)

Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-15

Revisado por:  
Enrique Limongi

Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Recipiente antidistorsión

Escala: 1:4

Unidades: mm

Fecha:  
04/12/2006

2

1

2

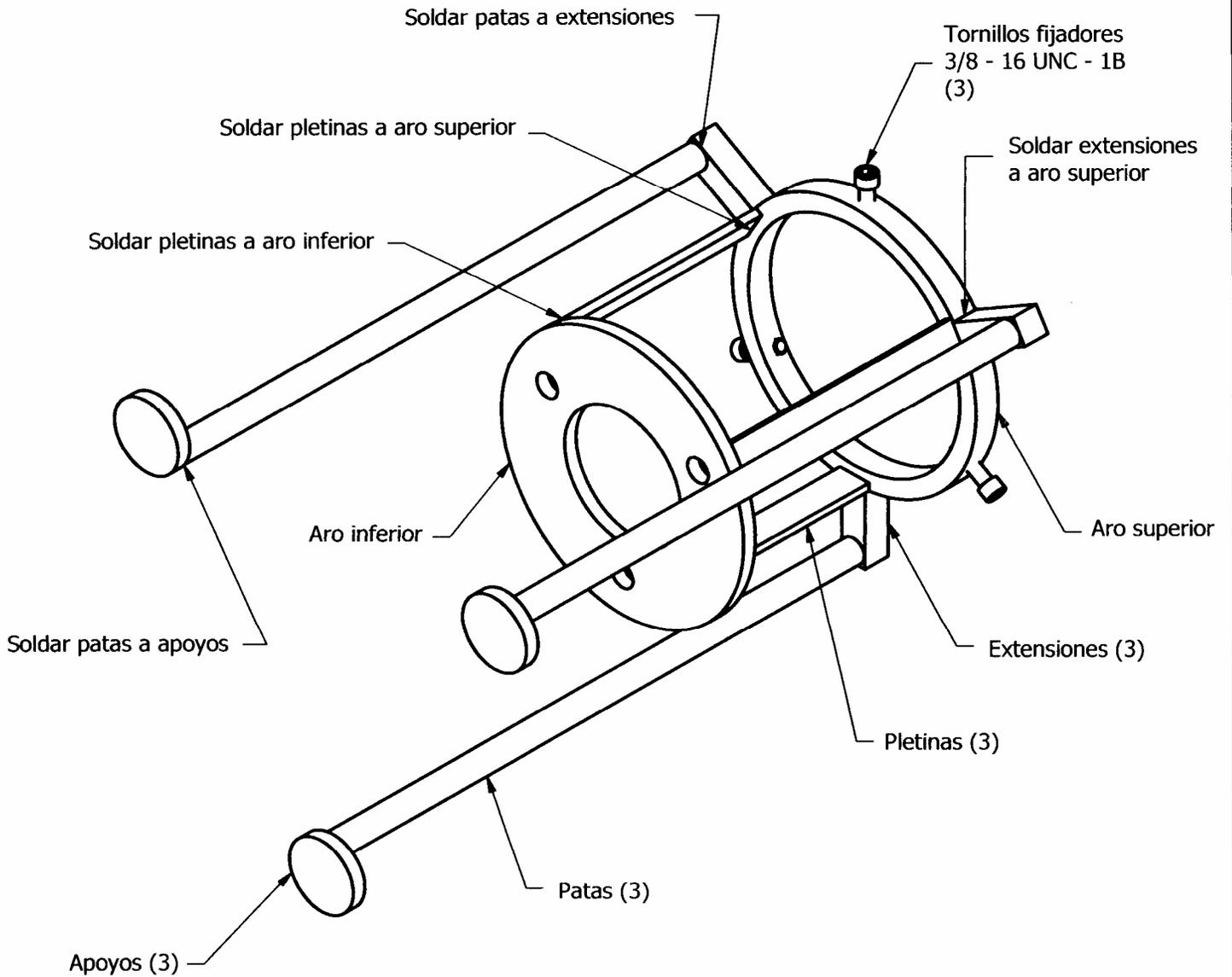
1

B

B

A

A



Diseñado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Universidad Central de Venezuela  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

Plano: C-16

Revisado por:  
Enrique Limongi

Escala: 1:4

Unidades: mm

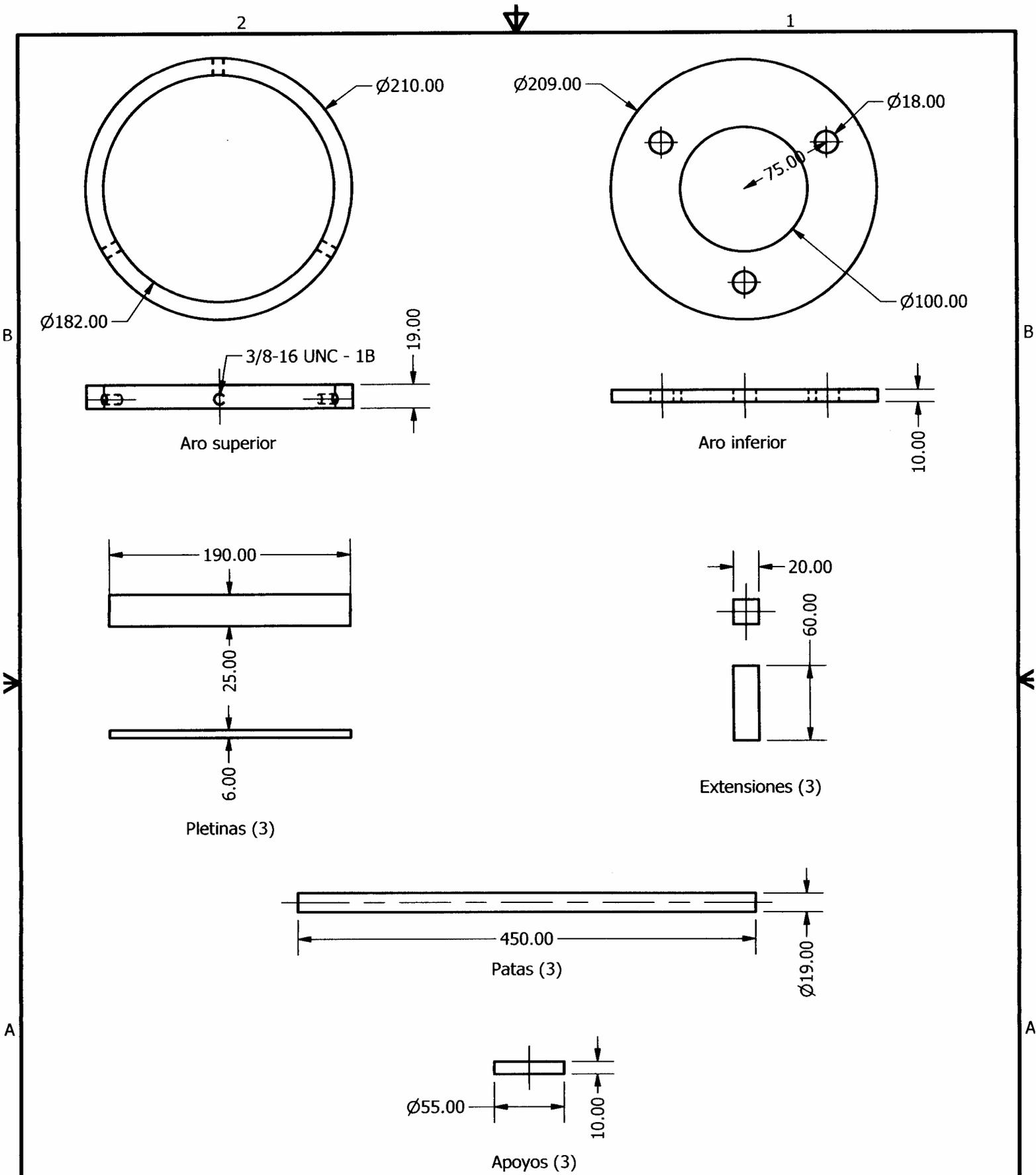
Dibujado por:  
John Tavera, Vanessa Hernández

Ensamblaje de la base del  
recipiente a presión

Fecha:  
04/12/2006

2

1



Diseñado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Universidad Central de Venezuela Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica	Plano: C-17	Revisado por: Enrique Limongi
		Escala: 1:4	Unidades: mm
Dibujado por: John Tavera, Vanessa Hernández	Base del recipiente a presión	Fecha: 04/12/2006	