

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ENSAYOS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON EMULSIONES DE AGUA EN CRUDO

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. González F., Benjamín J. M.
Para optar al título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2005

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ENSAYOS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON EMULSIONES DE AGUA EN CRUDO

Tutor Académico: Prof. José A. Sorrentino.

Tutor Industrial: Ing. Marco Peña.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por el Br. González F., Benjamín J. M.
Para optar al título
de Ingeniero Químico

Caracas, 2005

Caracas, noviembre de 2005

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Química, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Benjamín J. M. González F, titulado:

“Desarrollo de un Sistema de Ensayos de Bombeo Electrosumergible con Emulsiones de Agua en Crudo”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Químico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Andrés Rosales
(Jurado)

Prof. Armando Vizcaya
(Jurado)

Prof. José A. Sorrentino
(Tutor Académico)

Ing. Marco Peña
(Tutor Industrial)

DEDICATORIA

*A Lourdes, Francisco, Verónica y Sinái, mi familia,
quienes en todo momento han estado a mi lado
y gracias a quienes he podido
alcanzar este título.
Los amo!*

Benjamín J. M. González F.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, a quien le debo todo y quien hizo posible que culminara con éxito mi carrera.

A mis padres Lourdes y Francisco que durante toda mi vida han estado a mi lado y quienes me han apoyado en absolutamente todo. Gracias mamá y papá.

A mis hermanas Verónica y Sinaí quienes de igual forma han estado siempre a mi lado preocupándose por mi y ayudándome en todo lo que pueden. Gracias y las quiero mucho.

A toda la Pericia de Emulsiones de PDVSA-Intevep, especialmente a Luis Rafael Marcano y a la Dra. Xiomara Gutiérrez quienes me prestaron todo su apoyo en la realización de este trabajo. De todo corazón muchísimas gracias.

A mi tutor Marco Peña por toda la ayuda y el apoyo prestados en la realización de esta tesis. Miles de gracias.

A Marcelo Reyna quien me ayudó enormemente en los comienzos de mis tesis y quien con sus chistes y anécdotas impidió que me durmiera en los largos días en Intevep. Muchas gracias Marcelo.

A Sharon Escalante quien me prestó toda su ayuda en Barinas. En verdad que muchas gracias Sharon.

A Malena y Alejandrito por ser tan buenos amigos, por apoyarme en lo bueno y en lo malo y simplemente por siempre estar ahí. Muchachos los quiero mucho.

A Andreina y Alejandro por no dejarme morir nunca y tampoco en la tesis y por ser tan buenos amigos. Gracias a ambos, los quiero mucho.

A mis amigos del colegio, Federico, Helys y Juan (los A/X's): muchachos por ustedes sé que la amistad existe. Gracias por nunca abandonarme, los quiero burda.

A mis amigos de la universidad, Geraldine, Pedro, Oscar, Claret y Adriana, con ustedes he vivido grandes momentos y espero que vivamos muchos más. De todo corazón miles de gracias.

A mis primas, Mafer, Zareth, M^a de Jesús, Samaris, Raquel, Jofreny y Jofrana, por siempre estar pendiente de mi. Las quiero mucho.

À mes amis français, Nolwenn, Loïc et Rosie, je veux vous remercier pour l'amitié que vous m'avez donnée, bien que vous soyez loin. Merci beaucoup.

González F. Benjamín J. M.

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE ENSAYOS DE BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE CON EMULSIONES DE AGUA EN CRUDO

**Tutor Académico: Prof. José A. Sorrentino. Tutor Industrial: Ing. Marco Peña. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Química. Año 2005,
193 p.**

Palabras Claves: Emulsiones, W/O, Levantamiento Artificial, Bombeo Electrosumergible, Mezclador Dinámico, Diámetro de Gota, Viscosidad Aparente, Surfactantes.

Resumen: El bombeo electrosumergible (BES) es un medio efectivo y económico para levantar grandes volúmenes de fluido desde grandes profundidades bajo una variedad de condiciones de pozo. La formación de emulsiones de agua en crudo (W/O) como consecuencia de la composición química del crudo y de las altas proporciones de agua puede traer como consecuencia detrimentos en el desempeño de los equipos de BES.

Para encarar estos Problemas PDVSA-Intevep desea desarrollar una línea de investigación en la que se pueda estudiar a profundidad el fenómeno de las emulsiones W/O en el desempeño del bombeo electrosumergible así como evaluar los efectos que produce la bomba sobre la emulsión en sí.

El objetivo general de este trabajo especial de grado fue desarrollar un sistema de ensayos de laboratorio en las instalaciones del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep que permita la evaluación del sistema de BES cuando se manejan emulsiones W/O, haciendo énfasis en el diseño de equipos para la preparación de emulsiones y en el establecimiento de las condiciones de los fluidos de trabajo para la formulación y preparación de las mismas.

Para lograr tal objetivo la investigación se realizó en dos etapas. La primera de ellas se realizó en el laboratorio de Físicoquímica de Producción de PDVSA-Intevep, en donde se prepararon distintas emulsiones W/O utilizando como fase continua crudo Cerro Negro diluido con tres porcentajes distintos de Diesel (7,5, 30 y 50% m/m) para simular viscosidades de crudos pesados, medianos y livianos. Para cada una de estas diluciones se dispersaron 5, 10, 20 y 30% de agua. Se les determinó la viscosidad aparente, la distribución de diámetro de gota y el tamaño promedio de gotas a cada una de las emulsiones. Igualmente se hicieron pruebas de estabilidad estática por 7 días a cada emulsión y pruebas de estabilidad dinámica a varias de las emulsiones preparadas.

Las experiencias realizadas en el citado laboratorio permitieron recolectar los datos necesarios para establecer las bases de diseño de los equipos que permitirán la reproducción de dichas emulsiones en el laboratorio de levantamiento Artificial.

Las dispersiones obtenidas tuvieron diámetros entre 2,3 y 6,7 μm lo que les da características de emulsiones. Igualmente presentaron una alta polidispersidad y varias de ellas se realizaron en un estado de no equilibrio dinámico.

Es importante destacar que para las emulsiones realizadas utilizando como fase continua crudo Cerro Negro diluido con 50% de diesel se adicionó TOFA (Tall oil fatty Acids) para suplir el déficit de surfactantes naturales causados por la dilución, y MEA (mono etanol amina) para promover la formación de carboxilatos que poseen mayor actividad interfacial con lo que se pueden obtener emulsiones más estable. Sin embargo, no se pudo obtener la estabilidad deseada en las emulsiones cuando se dispersó 20 y 30% de agua.

La segunda etapa de la investigación fue realizada en el laboratorio de Levantamiento Artificial, primeramente se realizó una revisión de las actuales facilidades experimentales con lo que se concluyó que es necesario desarrollar nuevas facilidades que permitan la formación de emulsiones por lo que se procedió al desarrollo del esquema que lo permitirá. Igualmente se diseñó un mezclador dinámico con base en el escalamiento del equipo usado en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción que va ser el equipo más importante de las nuevas facilidades ya que permitirá dimensionar el tamaño de gota de las emulsiones W/O formadas. Para el escalamiento de este equipo se conservó la similitud geométrica y se tomó el caso más crítico que fue aquél en el que se consumió la mayor cantidad de potencia específica e igualmente se conservó este parámetro.

Para la reproducción de las emulsiones realizadas en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción en régimen laminar o en régimen de transición cercano al límite con el régimen laminar, se debe mantener la misma tasa de corte. Para la reproducción de las emulsiones realizadas en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción en régimen turbulento o en régimen de transición cercano al límite con el régimen turbulento, se debe mantener la misma energía específica.

Es necesario de igual manera realizar tres modificaciones en las facilidades existentes: la entrada directa al reservorio, el bypass para saltar ciertos equipos que no son necesarios en las pruebas con emulsiones W/O y un equipo que permita separar las fases continúa y discontinua de las emulsiones.

Se recomienda ampliar las diluciones hechas con diesel al crudo Cerro Negro así como las proporciones de agua a dispersar para así ampliar la gama de emulsiones a producir en el laboratorio de Levantamiento Artificial. Igualmente se recomienda hacer las modificaciones necesarias para evaluar el escenario en que el agua y el crudo entran sin formar una emulsión

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
ÍNDICE DE GRÁFICOS	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
ÍNDICE DE ANEXOS	XVII
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS Y ANTECEDENTES	1
I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
I.2 OBJETIVOS	4
I.2.1 Objetivo General.....	4
I.2.2 Objetivos Específicos	4
I.3 ANTECEDENTES	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	8
II.1 TERMINOLOGÍA DE YACIMIENTO.....	8
II.1.1 Yacimiento	8
II.1.1.1 Propiedades de la Roca	8
II.1.1.1.1 Porosidad	8
II.1.1.1.2 Permeabilidad	9
II.1.1.2 Propiedades del Petróleo.....	9
II.1.1.2.1 Densidad	9
II.1.1.2.2 Viscosidad	9
II.1.1.2.3 Punto de Fluidez	9
II.1.1.2.4 Punto de Inflamación.....	9
II.1.1.2.5 Presión de Vapor	10
II.1.1.3 Mecanismos de Empuje en Yacimientos	10
II.1.1.3.1 Empuje por Gas en Solución	10
II.1.1.3.2 Empuje por Capa de Gas	10
II.1.1.3.3 Empuje Hidráulico.....	11
II.1.2 Pozo.....	11
II.1.3 Revestidor (Casing).....	11
II.1.4 Cabezal de Pozo	12
II.1.5 Tubería de Producción	12
II.2 MECANISMOS O MÉTODOS DE PRODUCCIÓN	12
II.2.1 Flujo Natural	12
II.2.2 Levantamiento Artificial	12
II.2.2.1 Levantamiento Artificial por Gas (Gas Lift):	13
II.2.2.2 Levantamiento artificial por Bombeo	13
II.2.2.2.1 Bombeo Mecánico (BMC)	13
II.2.2.2.2 Bombeo de Cavidades Progresivas (BCP)	14
II.2.2.2.3 Bombeo Hidráulico (BH)	14
II.2.3 Levantamiento artificial en Venezuela.....	14

II.3 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)	15
II.3.1 Clasificación de las bombas centrífugas	15
II.3.2 Componentes de los Sistemas de Bombeo Electrosumergible.....	17
II.3.2.1 Equipos de Subsuelo.....	17
II.3.2.1.1 Bomba Centrífuga	17
II.3.2.1.2 Pump Intake.....	20
II.3.2.1.3 Motor	22
II.3.2.1.4 Sello o Protector	24
II.3.2.1.5 Cable de Potencia	26
II.3.2.1.6 Flejes para Cables.....	26
II.3.2.1.7 Cable Plano del motor	27
II.3.2.2 Equipos de Superficie	27
II.3.2.2.1 Transformador	27
II.3.2.2.2 Tablero de Control.....	28
II.3.2.2.3 Variador de Frecuencia.....	28
II.3.2.2.4 Caja de Empalme o Venteo	29
II.3.2.3 Equipos Misceláneos	29
II.3.2.3.1 Válvulas de Retención.....	29
II.3.2.3.2 Centralizadores	30
II.3.2.3.3 Penetradores	30
II.3.2.3.4 Y-tools	30
II.3.2.3.5 Camisa para Motor (shroud o motor jacket).....	30
II.3.3 Configuraciones de BES	30
II.3.3.1 Impulsor e Inyección.....	30
II.3.3.2 Toma de fondo y descarga de fondo	31
II.3.3.3 Configuración de Cubierta.....	31
II.3.4 Carta amperimétrica	31
II.3.5 Ventajas del Sistema de BES con respecto a otras metodologías de levantamiento artificial	32
II.3.6 Limitaciones del sistema de BES con respecto a otras metodologías de levantamiento artificial	32
II.4 EMULSIONES.....	32
II.4.1 Definición:.....	32
II.4.2 Generalidades sobre emulsiones.	33
II.4.3 Composición de una emulsión	34
II.4.4 Clasificación de las emulsiones según la naturaleza de la fase interna.....	36
II.4.5 Como se forman las emulsiones.....	36
II.4.6 Agentes Emulsificantes	38
II.4.6.1 Surfactantes Naturales	39
II.4.6.2 Sustitutos de los Surfactantes Naturales	40
II.4.6.2.1 TOFA.....	40
II.4.6.2.2 Formación de Carboxilatos.....	41
II.4.7 Demulsificación	41
II.4.8 Desestabilización de Emulsiones	41
II.4.9 Mecanismos involucrados en la Demulsificación.....	42

II.4.9.1 Sedimentación:.....	42
II.4.9.2 Floculación o Agregación.....	42
II.4.9.3 Coalescencia.....	43
II.4.10 Comportamiento de las emulsiones bajo cizallamiento.....	43
II.5 VISCOSIDAD DE LAS EMULSIONES.....	45
II.5.1 Definición de Viscosidad.....	45
II.5.1.1 Viscosidad Aparente.....	46
II.5.2 Reología.....	46
II.5.3 Factores determinantes de la Viscosidad de las Emulsiones.....	47
II.5.3.1 Viscosidad de la Fase Externa.....	47
II.5.3.2 Proporción de la Fase Interna.....	48
II.5.3.3 Tamaño de Gotas.....	51
II.5.3.4 Viscosidad de la Fase Interna.....	53
II.5.3.5 Efectos Electroviscosos.....	54
II.5.3.6 Efecto de la Formulación.....	54
II.6 OTROS CONCEPTOS.....	55
II.6.1 Ley de Stokes.....	55
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....	56
III.1 FORMULACIÓN DE EMULSIONES.....	58
III.1.1 Formulación de emulsiones con diluciones de crudo Cerro Negro.....	59
III.1.1.1 Material de Prueba.....	59
III.1.1.2 Descripción del Mezclado.....	60
III.1.1.2.1 Geometría estándar.....	60
III.1.1.2.2 Geometría del impulsor.....	61
III.1.1.2.3 Equipo Utilizado.....	63
III.1.1.2.4 Procedimiento experimental.....	65
III.1.1.2.5 Temperaturas de formulación.....	68
III.1.1.2.6 Cantidad de Agua.....	68
III.1.1.3 Determinación de Viscosidad de Emulsiones.....	68
III.1.1.3.1 Descripción del Equipo.....	68
III.1.1.3.1.1 Cabezal del Viscosímetro.....	68
III.1.1.3.1.2 Recipiente de Atemperación.....	69
III.1.1.3.1.3 Sistemas sensores.....	69
III.1.1.3.1.3.1 Sistema sensor MV.....	69
III.1.1.3.1.3.2 Sistema Sensor SV.....	71
III.1.1.3.1.4 Software.....	73
III.1.1.3.2 Procedimiento experimental.....	74
III.1.1.4 Tamaño de gota promedio y distribución de tamaño de gota.....	76
III.1.1.4.1 Descripción del Equipo.....	76
III.1.1.4.2 Análisis de Imágenes.....	77
III.1.1.4.3 Procedimiento Experimental.....	79
III.1.1.5 Presentación de Resultados.....	80
III.1.2 Cinética de Formación de emulsiones.....	81
III.1.2.1 Procedimiento experimental.....	81
III.1.3 Estabilidad estática de emulsiones.....	82

III.1.3.1 Procedimiento experimental	82
III.1.4 Estabilidad Dinámica de emulsiones	82
III.1.4.1 Descripción del equipo	83
III.1.4.2 Mecanismos representados en el reómetro	83
III.1.4.3 Procedimiento experimental	85
III.2 REVISIÓN DE FACILIDADES EXISTENTES EN EL LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE PDVSA-Intevep	86
III.2.1 Revisión de diagramas de flujos	86
III.2.2 Elaboración de lista de equipos	86
III.3 DISEÑO DE NUEVAS FACILIDADES EXPERIMENTALES EN LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE PDVSA-Intevep.	87
III.3.1 Elaboración de Diagrama de flujo de Proceso	87
III.3.1.1 Información de flujos másicos y volumétricos	87
III.3.1.2 Equipos de proceso	88
III.3.1.3 Líneas de proceso	88
III.3.1.4 Control del proceso	89
III.3.2 Escalamiento	90
III.3.2.1 Escogencia del Impulsor	90
III.3.2.2 Principios de Similitud	90
III.3.2.3 Dimensionamiento del Mezclador Dinámico	92
III.3.2.3.1 Régimen de Mezclado	92
III.3.2.3.2 Escalamiento del Impulsor	97
III.3.2.3.2.1 Potencia del Motor	97
III.3.2.3.2.1.1 Volumen del Mezclador	98
III.3.2.3.2.2 Flujo Másico	99
III.3.2.3.2.3 Diámetro del Impulsor	99
III.3.2.3.3 Recipiente	100
III.3.2.3.3.1 Diámetro interno	101
III.3.2.3.3.2 Altura	102
III.3.2.3.3.3 Diámetro externo.	102
III.3.2.4 Reproducción de Emulsiones en el Mezclador Dinámico	103
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	105
IV.1 EMULSIONES	105
IV.1.1 Formación de Emulsiones	105
IV.1.2 Estabilidad Estática de las Emulsiones	109
IV.1.2.1 Adición de Surfactantes	119
IV.1.3 Estabilidad Dinámica	124
IV.1.4 Variaciones del diámetro	127
IV.1.5 Variaciones en la Viscosidad Aparente	130
IV.2 LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	134
IV.2.1 Revisión de Facilidades Existentes	134
IV.2.1.1 Descripción del proceso del circuito de BES del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.	134
IV.2.1.2 Lista de Equipos	137
IV.2.1.3 Descripción de la Bomba Electrosumergible (BES)	139

IV.2.2 Nuevas Facilidades Experimentales	140
IV.2.2.1 Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y Descripción del Proceso.....	140
IV.2.2.1.1 Dilución del Crudo Cerro Negro.....	141
IV.2.2.1.2 Formación de Emulsiones.....	144
IV.2.2.2 Lista de Equipos	146
IV.2.2.3 Dimensionamiento del Mezclador Dinámico MD-101	149
IV.2.2.3.1 Tasa de Corte	149
IV.2.2.3.2 Viscosidad Aparente	150
IV.2.2.3.3 Potencia y Número de Potencia	152
IV.2.2.3.4 Régimen de mezclado	152
IV.2.2.3.5 Escalamiento del Impulsor.....	153
IV.2.2.3.5.1 Potencia del Motor.....	153
IV.2.2.3.5.2 Diámetro y otras medidas del Impulsor.....	154
IV.2.2.3.5.3 Material del Impulsor	157
IV.2.2.3.6 Recipiente	157
IV.2.2.3.6.1 Material del Recipiente.....	157
IV.2.2.4 Reproducción de Emulsiones en el MD-101.....	158
IV.2.3 Modificaciones en el Circuito de Prueba del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.....	159
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	162
CONCLUSIONES.....	162
V.1 EMULSIONES.....	162
V.2 LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL	163
RECOMENDACIONES	165
BIBLIOGRAFÍA	167
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Diagrama del circuito de pruebas de viscosidad.....	7
Figura N° 2. Metodologías de Levantamiento Artificial en Venezuela	15
Figura N° 3. Componentes del Sistema BES.....	17
Figura N° 4. Bomba Centrífuga. Centrilift	18
Figura N° 5. Configuraciones de Separadores de gas. Centrilift	22
Figura N° 6. Motor de Sistema BES.....	23
Figura N° 7. Sello o Protector.....	25
Figura N° 8. Configuraciones de Cables de Potencia.....	26
Figura N° 9. Variador de Frecuencia.....	29
Figura N° 10. Carta amperimétrica.....	31
Figura N° 11. Interrelaciones de causa a efecto entre variables, fenómenos y propiedades de las emulsiones.....	34
Figura N° 12. Diferentes tipos de emulsiones	36
Figura N° 13. Ejemplos de estructuras moleculares.....	40
Figura N° 14. Compuestos Principales de la TOFA.....	40
Figura N° 15. Procesos que acarrearán el rompimiento de una emulsión	43
Figura N° 16. Gráfica definiendo el concepto de viscosidad η	45
Figura N° 17. Variación de la viscosidad relativa con el contenido de fase interna.....	49
Figura N° 18. Efecto de la proporción de fase interna para varias emulsiones de crudo pesado en agua	51
Figura N° 19. Viscosidad aparente de una emulsión obtenida al mezclar las dos emulsiones bases de diámetros medios diferentes (d_p y d_g)	53
Figura N° 20. Esquema de la Metodología.....	58
Figura N° 21. Geometría estándar para un tanque de mezclado con uno o dos impulsores.....	61
Figura N° 22. Impulsor radial Rushton.....	62
Figura N° 23. Beaker para la formulación de emulsiones	63
Figura N° 24. Equipo de Mezclado para la formulación de Emulsiones.....	64
Figura N° 25. T.K Robomics f_{model}	65
Figura N° 26. Viscosímetro HAAKE CV30.....	69
Figura N° 27. Sistema Sensor MV.....	70
Figura N° 28. Sistema Sensor SV	72
Figura N° 29. Representación esquemática de los sistemas sensores MV y SV	75
Figura N° 30. Hoja de resultados de medición de viscosidad	76
Figura N° 31. Microscopio ZEISS Axioplan 2.....	77
Figura N° 32. Pantalla de Resultados Image Pro-Plus Versión 5.0.....	78
Figura N° 33. Ejemplo de foto tomada con el microscopio ZEISS Axioplan 2.....	80
Figura N° 34. Diagrama esquemático del reómetro de coalescencia.....	84
Figura N° 35. Ejemplo de similitud geométrica	91
Figura N° 36. Diagrama esquemático de la sección transversal de la sección de un mezclador rotor/estator.....	101
Figura N° 37. Emulsión Múltiple O/W/O.....	122

Figura N° 38. Diagrama de Tuberías e Instrumentación del Circuito de Bombeo Elctrosurgible de PDVSA-Intevp.....	136
Figura N° 39. Diagrama de Flujo de Procesos de Nuevas Instalaciones en el Laboratorio de Levantamiento Artificial.....	142
Figura N° 40. Estrategia de Control de Relación Para la dilución crudo Cerro Negro Diesel	143
Figura N° 41. Estrategia de Control de Relación Para la Formación de Emulsiones de Agua en Crudo.....	146
Figura N° 42. Dimensiones del Impulsor. a) Vista frontal. b) Vista Inferior. c) Vista Superior.....	156
Figura N° 43. Tanque del mezclador dinámico MD-101	157
Figura N° 44. Modificaciones del Actual Circuito de Pruebas del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevp.....	160
Figura N° 45. Ubicación de los campos productores en los estados Apure y Barinas ¡Error! Marcador no definido.	
Figura N° 46. Ubicación de Pozos, Campo Guafita	¡Error! Marcador no definido.
Figura N° 47. Carta Amperimétrica del Pozo GF-144	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 1. Viscosidad del crudo Cerro Negro en función del porcentaje de crudo usado en la dilución.....	59
Gráfico N° 2. Rango de medida del sistema sensor MV	71
Gráfico N° 3. Rango de medición del sistema sensor SV	73
Gráfico N° 4. Ejemplo de gráfico de distribución acumulada de tamaño de gota.....	78
Gráfico N° 5. Modelo de gráfico esperado en prueba de cinética de formación de emulsiones	81
Gráfico N° 6. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 1000RPM.....	110
Gráfico N° 7. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 1000RPM. Temperatura: 50°C	110
Gráfico N° 8. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 1000RPM..	112
Gráfico N° 9. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 1000RPM. Temperatura: 50°C	112
Gráfico N° 10. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM.....	114
Gráfico N° 11. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM. Temperatura: 50°C	114
Gráfico N° 12. Cinética de formación de Emulsión. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM.....	115
Gráfico N° 13. Distribución de Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM. a) Día 0. b) Día 5.....	117
Gráfico N° 14. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0,126% MEA.....	120
Gráfico N° 15. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0,126 MEA. Temperatura: 50 °C.....	121
Gráfico N° 16. Estabilidad Dinámica de Emulsiones. Variación del Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel:70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM	125
Gráfico N° 17. Estabilidad Dinámica de Emulsiones. Variación del Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM	126
Gráfico N° 18. Variación del Diámetro de Gota con respecto al Porcentaje de Diesel presente en la fase continua.	127

Gráfico N° 19. Variación del Diámetro de Gota con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado.	129
Gráfico N° 20. Variación de la Viscosidad Aparente a 20 s^{-1} y 50°C con respecto al porcentaje de Diesel presente en la fase continua.....	130
Gráfico N° 21. Variación de la Viscosidad Aparente a 20 s^{-1} y 50°C con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado. Proporción Crudo / Diesel 92,5:7,5.....	131
Gráfico N° 22. Variación de la Viscosidad Aparente a 20 s^{-1} y 50°C con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado. Proporción Crudo / Diesel 70:30.....	132
Gráfico N° 23. Variación de la Viscosidad Aparente a 20 s^{-1} y 50°C con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado. Proporción Crudo / Diesel 50:50.....	132
Gráfico N° 24. Datos del sensor de fondo pozo GF-144	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 25. Datos del sensor de Fondo, pozo BOR-17 ...	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 26. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 2500RPM.	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 27. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 2500RPM. Temperatura: 50°C	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 28. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 3000RPM	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 29. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 3000RPM. Temperatura: 50°C	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 30. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 2000RPM..	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 31. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 2000RPM. Temperatura: 50°C	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 32. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 4000RPM.	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 33. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 4000RPM. Temperatura: 50°C	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 34. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0,126% MEA.....	¡Error! Marcador no definido.
Gráfico N° 35. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 5500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0,126 MEA. Temperatura: 50°C .	¡Error! Marcador no definido.

- Gráfico N° 36. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 1000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 37. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 1000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 38. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 2500RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 39. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 3000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 40. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 2000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 41. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 42. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 4000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 43. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 5000RPM. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 44. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 5500RPM. 5 % TOFA. 0,126% MEA. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 45. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. 5 % TOFA. 0,126% MEA. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 46. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 7500RPM. 5 % TOFA. **¡Error! Marcador no definido.**
- Gráfico N° 47. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 8500RPM. 5 % TOFA. 0,0066% MEA. **¡Error! Marcador no definido.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Motores para distintos diámetros de revestidor.....	24
Tabla N° 2. Propiedades del crudo Cerro Negro	59
Tabla N° 3. Variación de viscosidad referente a las diluciones con diesel.....	60
Tabla N° 4. Características del sistema sensor MV	70
Tabla N° 5. Características del sistema sensor SV	72
Tabla N° 6. Tabla ejemplo, resultado de preparación de Emulsiones	81
Tabla N° 7. Mecanismos responsables del deterioro de emulsiones y su impacto.....	84
Tabla N° 8. Información reportada en DFP's de algunos equipos	88
Tabla N° 9. Valores del número de Reynolds para los distintos regímenes	93
Tabla N° 10. Velocidades del Impulsor obtenidas en la formación de Emulsiones para la relación Crudo/Diesel 92,5:7,5	106
Tabla N° 11. Velocidades del Impulsor obtenidas en la formación de Emulsiones para la relación Crudo/Diesel 70:30	107
Tabla N° 12. Velocidades del Impulsor obtenidas en la formación de Emulsiones para la relación Crudo/Diesel 50:50	108
Tabla N° 13. Estadísticas Referentes a la distribución de Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM. Día 0 y Día 5.....	117
Tabla N° 14. Estabilidad Estática de Emulsiones. Día de Coalescencia	118
Tabla N° 15. Resultados de Emulsiones de crudo Cerro Negro diluido en 50% de Diesel. Utilización de TOFA y MEA.....	123
Tabla N° 16. Emulsiones sometidas a la prueba de estabilidad dinámica	125
Tabla N° 17. Lista de Tanques.....	137
Tabla N° 18. Lista de Recipientes	137
Tabla N° 19. Lista de Bombas	139
Tabla N° 20. Lista de Bombas (Continuación).....	139
Tabla N° 21. Lista de Nuevos Tanques	147
Tabla N° 22. Lista de nuevas Bombas	149
Tabla N° 23. Tasas de Corte para las distintas Emulsiones.....	150
Tabla N° 24. Viscosidad aparente a 50°C.....	151
Tabla N° 25. Potencia de Mezclado y Número de Potencia.....	152
Tabla N° 26. Regímenes de flujo.....	153
Tabla N° 27. Potencia del Motor	153
Tabla N° 28. Diámetro del Impulsor escalado.....	155
Tabla N° 29. Medidas originales y medidas escaladas del Impulsor.....	155
Tabla N° 30. Características del recipiente del MD-101	157
Tabla N° 31. Velocidades del Impulsor escalado	158
Tabla N° 32. Historial de Producción pozo GF-105.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla N° 33. Historial de Producción pozo GF-144.....	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1. Problemas en bombas electrosumergibles asociados a emulsiones. Distrito Barinas.	¡Error! Marcador no definido.
Anexo N° 2. Procedimiento Experimental detallado para la prueba de estabilidad dinámica de emulsiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo N° 3. Estabilidad estática de Emulsiones.....	¡Error! Marcador no definido.
Anexo N° 4. Reogramas	¡Error! Marcador no definido.
Anexo N° 5. Número de Potencia Impulsor Rushton.....	¡Error! Marcador no definido.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA, OBJETIVOS Y ANTECEDENTES

I.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los programas de explotación masiva de petróleo han ocasionado una considerable reducción de la presión de los yacimientos, esto implica que el fluido tendrá dificultades para llegar a la superficie y ser extraído de forma natural. A partir de esto se crea la necesidad de utilizar métodos para levantar ese fluido y poderlo extraer desde el subsuelo hasta la superficie bien sea con la ayuda de otros fluidos o de medios mecánicos y son estos métodos los que conforman el campo del levantamiento artificial.¹

Entre las metodologías de levantamiento artificial se encuentra el bombeo electrosumergible (BES), el cual es considerado un medio efectivo y económico para levantar grandes volúmenes de fluidos desde grandes profundidades bajo una variedad de condiciones del pozo. El bombeo electrosumergible está compuesto por una serie de componentes mayores: motor eléctrico, sección del sello o protector, separador de gas, bomba centrífuga multi-etapa, cable eléctrico de potencia, controlador del motor y transformadores. También se compone de otros equipos misceláneos y opcionales.²

Actualmente, tanto mundialmente como en PDSVA, el método de Bombeo Electrosumergible para levantamiento artificial de crudos es uno de los métodos de producción que requiere mayor inversión inicial, razón por la cual se ha dedicado gran esfuerzo a su investigación para su adecuada aplicación en los campos venezolanos.

Esta metodología de levantamiento artificial es utilizada en diversas zonas del país, como ejemplo de esto se puede mencionar al Distrito Barinas en donde el bombeo electrosumergible es el método de levantamiento artificial usado por excelencia: en los campos de Barinas el 70% de los pozos son levantados con sistemas BES y en Apure casi el 100% de los pozos. Esta zona esta marcada por los altos cortes de agua* (en promedio

1

* Altas proporciones de agua

superiores a 80%) por lo que se requiere una alta tasa de producción para cubrir los costos operativos y a esto se le suma la baja relación gas petróleo (RGP) de estos fluidos, por lo que la selección de esta metodología se hace la más indicada.

El alto porcentaje de agua en conjunto con la composición química del crudo son elementos que promueven la formación de emulsiones, lo cual ha traído como consecuencia detrimentos en el desempeño de los equipos de bombeo electrosumergible.

Existen dos escenarios muy bien definidos en la producción de crudo emulsionado, en el primero de ellos el agua y el crudo entran a la bomba como dos fases independientes, en el segundo, el agua emulsionada en el crudo, entra a la bomba. Sea cual sea el escenario, el desempeño de la bomba se va a ver afectado por el esfuerzo de corte que las etapas van a ejercer sobre el fluido, lo que traerá como consecuencia cambios en las propiedades del crudo que es manejado y degradación del comportamiento original de la bomba.

La formación de una emulsión de agua en crudo va a traer como consecuencia que el fluido emulsionado tenga un comportamiento pseudoplástico, es decir, un comportamiento no-newtoniano, lo que implica que la viscosidad será función del esfuerzo de corte. Por lo tanto, la formación de este tipo de emulsiones crea un aumento en la viscosidad del fluido que está siendo extraído para la misma tasa de corte a medida que aumenta el porcentaje de agua que se encuentra emulsionado.

El manejo con sistemas BES de fluidos viscosos generará los siguientes inconvenientes:³

- Se incrementa la potencia consumida.
- Se reducen la altura dinámica y la eficiencia de la bomba.
- Los cojinetes estarán sujetos a una mayor carga radial cuando el eje de la bomba se desplace.

En el Anexo N° 1, se describen dos casos de pozos que han presentado problemas asociados al manejo de emulsiones con el bombeo electrosumergible.

Para encarar estos problemas, PDVSA - Intevep desea desarrollar una línea de investigación en la que se pueda estudiar a profundidad el fenómeno de las emulsiones de agua en crudo en el desempeño del bombeo electrosumergible así como evaluar los efectos que produce la bomba sobre la emulsión en sí. Como primera fase del proyecto, sólo se considerará el caso en que la emulsión entra formada a la bomba, para ello se desea adecuar el actual circuito de ensayos de bombeo electrosumergible del laboratorio de Levantamiento Artificial ubicado dentro de las instalaciones de PDVSA – Intevep, mediante la revisión de las facilidades ya existentes en el mismo y el diseño de nuevas facilidades que permitan constituir un circuito para realizar pruebas de esta índole.

I.2 OBJETIVOS

A continuación se presentan los objetivos que se desean alcanzar en la realización de este trabajo especial de grado.

I.2.1 Objetivo General

- Desarrollar un sistema de ensayos de laboratorio en las instalaciones del laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA–Intevep que permita la evaluación del sistema de bombeo electrosumergible de producción de crudo, cuando se manejan emulsiones de agua en crudo a través de la bomba, haciendo énfasis en el diseño de equipos para la preparación de emulsiones y en el establecimiento de las condiciones de los fluidos de trabajo para la formulación y preparación de tales emulsiones.

I.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una revisión bibliográfica orientada en la adquisición de información y estudio de los parámetros que rigen el comportamiento de las bombas electrosumergibles, el estudio teórico de las características de los crudos en general y la teoría básica relacionada a la formación y formulación de emulsiones; de igual modo hacer una revisión de antecedentes de campo relacionada a aplicaciones previas de bombas electrosumergibles trabajando con crudo emulsionado. Esto con el fin de adquirir y ampliar los conocimientos básicos relacionados al tema y enmarcar la problemática planteada.
- Preparar emulsiones de agua en crudo a nivel del laboratorio de fisicoquímica de producción de PDVSA-Intevep que reproduzcan las características de viscosidad de crudos pesados, medianos y livianos, para desarrollar posteriormente el esquema a ser utilizado en el laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA – Intevep que permita la reproducción de tales emulsiones.

- Realizar la revisión de facilidades experimentales existentes en el laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA-Intevep para determinar la posible adecuación de las mismas a las pruebas requeridas.
- Realizar y sugerir un esquema de las facilidades experimentales adicionales necesarias para llevar a cabo los ensayos en el laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA - Intevep.
- Diseñar el equipo para la producción de emulsiones en el nuevo circuito de pruebas del laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA-Intevep, con base en el escalamiento del equipo utilizado en el laboratorio de fisicoquímica de producción de PDVSA-Intevep con el fin de reproducir las propiedades obtenidas en tales emulsiones.

I.3 ANTECEDENTES ⁴

En mayo de 2002, se presentó en Houston, Texas, en el Workshop de bombeo electrosumergible de la SPE, un trabajo titulado “Emulsion Viscosity Testing with ESP’s”. En dicho trabajo se usaron dos bombas diferentes (FC2700 de diez etapas y K28) para determinar la formación de emulsiones y su impacto en el desempeño de las BES, usando dos crudos distintos y agua de producción. Las pruebas de desempeño utilizando crudo (0% de agua) a distintas temperaturas, incluyendo las temperaturas de fondo de pozo de 75 y 140 °F, establecieron las curvas base. Familias de curvas de desempeño desarrolladas para cabezal, potencia y eficiencia para distintos cortes de agua al ser graficadas en contra de las curvas base de crudo determinaron la viscosidad de bombeo deducida de las emulsiones.

Las pruebas con crudo base a distinta viscosidades permitieron desarrollar modificadores para el flujo, cabezal y potencia en los rangos operacionales de la bomba. La obtención de estos es de vital desarrollo tanto para el diseño como para la evaluación de la bomba.

Los objetivos de las pruebas realizadas fueron los siguientes:

1. Determinar el impacto que tienen fluidos de viscosidad conocida sobre el desempeño de la bomba.
2. Evaluar el funcionamiento de la bomba con emulsiones de alto corte de agua y determinar la viscosidad de bombeo y el punto de inversión de la emulsión.
3. Tomar muestras de la emulsión para cada corte de agua. Medir la viscosidad y determinar el punto de inversión.
4. Determinar si las medidas de bajo cizallamiento con un viscosímetro de Brookfield representan adecuadamente la viscosidad de bombeo.
5. Desarrollar la curva de viscosidad relativa (emulsión/crudo base) en función del corte de agua y modificadores (flujo, cabezal y potencia) que puede ser usado en el diseño de BES y en el “history matching”.

Para el cumplimiento de tales objetivos se desarrolló un circuito con instrumentación, siendo los parámetros medidos, el caudal, la densidad del fluido, el torque, velocidad (RPM), la presión en la toma, la presión en la descarga, la temperatura de descarga y la conductividad del fluido como un indicativo del punto de inversión de la emulsión. También posee un enfriador para mantener la temperatura del fluido del circuito. La Figura N° 1 muestra un dibujo esquemático del circuito experimental utilizado.

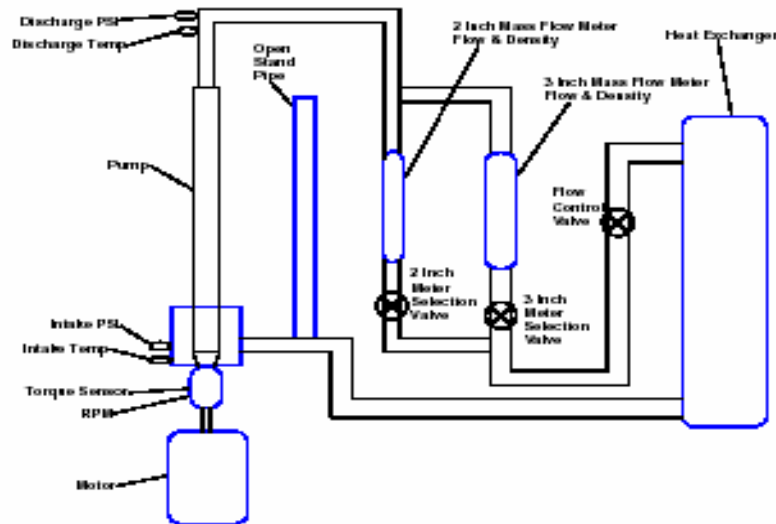


Figura N° 1. Diagrama del circuito de pruebas de viscosidad

Este trabajo principalmente permitió generar las curvas de cabezal, eficiencia y potencia de la bomba para emulsiones de crudo con distintos cortes de agua y para emulsiones de aceite mineral. Las curvas permitieron ver las variaciones de los parámetros a distintas viscosidades, sin embargo, este trabajo tiene sus limitaciones, puesto que aquí el agua es agregada gradualmente y como las pruebas se realizan en un circuito cerrado, el mismo fluido es cizallado por acción de la bomba varias veces, y esto se aleja un poco de lo que sucede realmente en campo, puesto que allí el agua no se incorpora gradualmente y el mismo fluido no pasa varias veces por la bomba. De igual modo las curvas hechas con aceite mineral difieren enormemente de las curvas realizadas con crudo.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

II.1 TERMINOLOGÍA DE YACIMIENTO

II.1.1 Yacimiento

Es una reserva natural de hidrocarburos. Esta acumulación natural de hidrocarburos puede o no estar en contacto con agua y posee características físicas, químicas y geológicas propias. En el yacimiento, los fluidos están confinados a altas presiones gracias a las barreras estratigráficas y estructurales que bordean al yacimiento; la única forma de que los fluidos contenidos en el yacimiento puedan llegar a la superficie es por medio de la perforación de un pozo. ¹

II.1.1.1 Propiedades de la Roca

II.1.1.1.1 Porosidad

La porosidad es definida como el cociente entre los espacios vacíos en una roca y el volumen de la masa de esa roca multiplicado por 100 para expresarlo en porcentaje. Este concepto también se refiere a la capacidad de almacenamiento de las formaciones en el subsuelo. La porosidad puede ser clasificada de acuerdo al modo de su origen como 1) original (primaria) – desarrollada durante la deposición de los sedimentos o 2) inducida (secundaria) – desarrollada por algunos procesos geológicos subsecuentes a la deposición de la roca. La porosidad original se caracteriza por la porosidad intergranular de areniscas, carbonatos, y la interpartícula y la porosidad oolítica de algunas piedras calizas. La porosidad inducida se caracteriza por el desarrollo de fracturas como las encontradas en algunas pizarras y piedras calizas o cavidades de soluciones comúnmente encontradas en las piedras calizas o por disolución de feldespatos en una arenisca. Las rocas que tienen porosidad original son más uniformes en sus características que aquellas rocas en las que una gran parte de la porosidad es inducida. Ampliando más, la porosidad puede ser definida como total o efectiva. La porosidad total es el cociente de los espacios vacíos totales en la roca y el volumen total de la masa de la roca; la porosidad efectiva es el cociente de los espacios vacíos interconectados en la roca y el volumen de la masa de la roca, expresado cada uno en términos porcentuales.

II.1.1.1.2 Permeabilidad

Es una medida de la capacidad del medio rocoso para conducir fluidos. Es medido en unidades de campo de darcys o milidarcys. Los canales del flujo son de distinta formas y tamaños y están conectados al azar. El flujo del fluido ocurre tanto vertical como horizontalmente. Muchas rocas porosas tendrán variaciones espaciales en permeabilidad. La permeabilidad de matriz se refiere al flujo en espacios de poros primarios en una roca en oposición con la permeabilidad de fractura que se refiere al flujo en hendiduras o grietas en la roca. En algunos yacimientos de arena y carbonatos la formación frecuentemente contiene canales de solución y fracturas naturales o artificiales. Estos canales y fracturas no cambian la permeabilidad de la matriz, pero si cambian la permeabilidad efectiva de la red de flujo.⁵

II.1.1.2 Propiedades del Petróleo

II.1.1.2.1 Densidad

Es la relación existente entre la masa del crudo y el volumen que ocupa esa misma masa. Para el caso específico del crudo, esta propiedad se determina en °API y denota la relación correspondiente de peso específico y de fluidez con respecto al agua.

II.1.1.2.2 Viscosidad

Esta es una de las características más importantes de los hidrocarburos en los aspectos operacionales de producción, transporte, refinación y petroquímica. La viscosidad es la resistencia a fluir que ofrece un líquido.⁶

II.1.1.2.3 Punto de Fluidez

Es la menor temperatura a la cual el crudo se mantiene todavía fluido, es decir, que se comporta como un líquido. En crudos, el punto de fluidez se incrementa por un alto contenido de parafinas.

II.1.1.2.4 Punto de Inflamación

Es la temperatura sobre la cual el crudo hace combustión espontáneamente.

II.1.1.2.5 Presión de Vapor

Es la presión por debajo de la cual, las moléculas del crudo pasan de la fase líquida a la fase gaseosa una temperatura dada. ⁷

II.1.1.3 Mecanismos de Empuje en Yacimientos

Muchas fuentes de energía existen en el yacimiento. En el caso del petróleo líquido, la energía natural es la energía expansiva del petróleo y el gas disuelto en él a la elevada presión a la que el petróleo está confinado. Además de la energía expansiva de los hidrocarburos, todas las acumulaciones de petróleo están asociadas con agua. La acumulación de crudo puede estar rodeada por formaciones acuíferas. Esta agua se encuentra sometida a elevadas presiones en el subsuelo. Luego del retiro del fluido del yacimiento petrolífero, éste se convierte en una aspiradora, el agua contigua fluye al yacimiento petrolífero, desplazando el crudo y el gas hacia los pozos. Además de las fuerzas de expansión, está también la fuerza de gravedad que actúa en todo momento, promoviendo la segregación de los diversos fluidos. El gas tiende a ocupar los sitios superiores en las acumulaciones; el crudo, siendo más denso que el gas y menos denso que el agua, tiende a ocupar la posición intermedia; y el agua tiende a estar debajo del crudo. Frecuentemente, se encuentra que en los campos petroleros una parte del yacimiento es líquido saturado y otra parte es gas saturado. Este tipo de acumulación esta referida como un yacimiento de crudo con una capa de gas.

II.1.1.3.1 Empuje por Gas en Solución

Es un yacimiento de crudo que no tiene una capa de gas libre y tampoco agua asociada; la principal energía es la expansión y disociación del gas en solución en el crudo. La producción de agua es generalmente mínima. El manejo de gas en solución se caracteriza por un descenso rápido en la presión y eficiencia baja en la recuperación.

II.1.1.3.2 Empuje por Capa de Gas

Es un yacimiento petrolífero que naturalmente contiene una capa de gas libre sin agua asociada. La presión del yacimiento se sitúa en niveles altos a todo momento (si la

capa de gas no es agotada prematuramente), mejorándose así la eficiencia en la recuperación. El grado de mejoramiento depende del tamaño relativo de la capa de gas con respecto a la zona del crudo y del procedimiento de producción usado.

II.1.1.3.3 Empuje Hidráulico

Es un yacimiento petrolífero asociado con formaciones acuíferas que son tan activas que ocurre muy poca o ninguna caída de presión cuando los hidrocarburos son sacados. Este tipo de empuje es el más eficiente en lo que respecta a mantener la presión del yacimiento y usualmente arroja las mayores eficiencias en recuperación. La producción de agua varía significativamente dependiendo de la posición estructural y de la naturaleza del empuje hidráulico.⁵

II.1.2 Pozo

Instalación constituida por una perforación que va desde la superficie hasta la parte porosa del yacimiento y que además posee todas las instalaciones requeridas para la extracción de los hidrocarburos del yacimiento hacia la superficie.⁷

II.1.3 Revestidor (Casing)

Es un conjunto de tuberías que se fija y cementa a las paredes del pozo, cuyo fin principal es prevenir la contaminación del yacimiento y evitar la entrada de fluidos externos a la zona productora. Además de proteger a la tubería de producción de los efectos del yacimiento, el revestidor puede permitir la acumulación de gas necesario para efectuar el levantamiento del fluido.⁸ Los revestidores son usualmente manufacturados de acero al carbón, el cual es tratado con fuego para variar las resistencias del mismo, pero pueden ser especialmente fabricados de acero inoxidable, aluminio, titanio, fibra de vidrio y otros materiales.⁷

II.1.4 Cabezal de Pozo

Es la terminación superficial de un pozo que incorpora facilidades para instalar los colgadores del revestidor durante la fase de construcción del pozo. El cabezal también incorpora un medio para suspender la tubería de producción e instalar el Árbol de Navidad y los controles de flujo superficiales en preparación para la fase de producción del pozo.⁷

II.1.5 Tubería de Producción

Se denomina así al conjunto de tuberías usadas para producir los fluidos del yacimiento. La tubería de producción es ensamblada junto con otros componentes de completación para conformar así la cadena de producción. La tubería de producción seleccionada para cualquier completación debe ser compatible con la geometría del pozo, las características productivas del yacimiento y los fluidos del yacimiento.⁷

II.2 MECANISMOS O MÉTODOS DE PRODUCCIÓN

II.2.1 Flujo Natural

Se dice que un pozo fluye naturalmente cuando la presión de formación del pozo es suficiente para producir crudo a una velocidad comercial sin requerir una bomba u otra metodología. Muchos yacimientos inicialmente poseen presiones suficientemente altas para dejar al pozo fluir naturalmente, pero este nivel de energía no es permanente, sino que por el contrario va disminuyendo a medida que son extraídos los fluidos del yacimiento, disminuyendo así la tasa de producción del pozo.

II.2.2 Levantamiento Artificial

Como consecuencia de los programas de explotación masiva se ha causado una considerable reducción de la presión en los yacimientos, por lo que el fluido tendrá dificultades de llegar a la superficie de forma natural. Basado en esto se crean los métodos de levantamiento artificial, que es simplemente cualquier sistema que le añade energía a la columna de fluido en un pozo con el objetivo de iniciar o mejorar la producción del mismo.

Se pueden dividir los métodos de levantamiento artificial en dos grupos:

- Levantamiento artificial por gas (L.A.G.).
- Levantamiento artificial por bombeo (L.A.B).

II.2.2.1 Levantamiento Artificial por Gas (Gas Lift):

El levantamiento artificial por gas constituye una metodología de levantamiento artificial bastante importante. Es un proceso de levantamiento de fluidos de un pozo, inyectando gas de relativa alta presión en la tubería de producción. Esta inyección de gas reduce la presión hidrostática de la columna de fluido. La resultante reducción en la presión del fondo permite que los líquidos del yacimiento entren en el pozo a una mayor velocidad de flujo.⁷

II.2.2.2 Levantamiento artificial por Bombeo

Se distinguen principalmente tres metodologías de bombeo convencional

- Bombeo Mecánico (BMC)
- Bombeo de cavidades progresivas (BCP)
- Bombeo Hidráulico (BH)
- Bombeo electrosumergible (BES)

II.2.2.2.1 Bombeo Mecánico (BMC)

Es un sistema de levantamiento artificial que utiliza una fuente superficial de potencia para manejar un montaje de bombeo que se encuentra debajo de la superficie. Un montaje de vigas y manivelas crea un movimiento reciprocante en una cadena de barras y succión que se conecta al montaje de bombeo de fondo. La bomba posee un pistón y un montaje de válvulas para convertir el movimiento reciprocante en movimiento vertical del fluido.⁹

II.2.2.2.2 Bombeo de Cavidades Progresivas (BCP)

En este método los fluidos experimentan un desplazamiento en forma helicoidal desde la succión hasta la descarga, a través de las cavidades formadas por el arreglo del rotor y estator de la bomba.

La bomba de cavidades progresivas es del tipo de desplazamiento positivo, que utiliza el principio del “tornillo de Arquímedes” para producir cavidades progresivas en la bomba, mediante movimiento giratorio del rotor generado en la superficie con la ayuda de un motor y transmitido a la bomba a través del cabezal de rotación y la sarta de cabillas.

La unión del rotor (metálico) y el estator (elastómero) crean cavidades que están perfectamente definidas y selladas y a la medida que gira el rotor estas cavidades avanzan hacia arriba, el estator es de un material elastomérico. Cuando el fluido entra en una cavidad, es forzado por el movimiento a la superficie en una forma suave y continua.⁹

II.2.2.2.3 Bombeo Hidráulico (BH)

Es un sistema de levantamiento artificial que opera usando una bomba a fondo de pozo. Una bomba hidráulica en la superficie presuriza al crudo llamado crudo potenciado, el cual maneja la bomba de fondo. Cuando se usa una secuencia de producción simple, el crudo potenciado es bombeado hacia el fondo de la tubería de producción y la mezcla del crudo de formación y el crudo potenciado a través del espacio anular entre el revestidor y la tubería de producción. Si se usan dos secuencias de producción, el crudo potenciado es bombeado a través de una de las tuberías, y la mezcla del crudo de formación y el crudo potenciado es producida en la otra tubería paralela.

II.2.3 Levantamiento artificial en Venezuela

A continuación se muestra en la Figura N° 2 una ilustración esquemática donde se esboza el porcentaje sobre el número total de pozos correspondiente a cada método de

levantamiento y el porcentaje sobre la producción total correspondiente de igual manera a cada método.

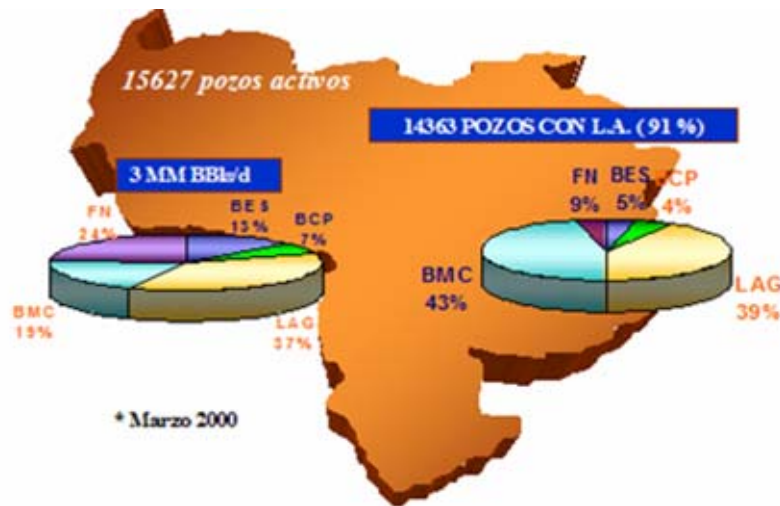


Figura N° 2. Metodologías de Levantamiento Artificial en Venezuela

II.3 BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE (BES)

II.3.1 Clasificación de las bombas centrífugas

Las bombas centrífugas son clasificadas de varias formas. A continuación algunas de las más comunes:

- Principio de transferencia de la energía al fluido** De acuerdo a esta definición las bombas se clasifican en dos grupos básicos: bombas dinámicas y bombas de desplazamiento. Las bombas electrosumergibles entran en la categoría de bombas dinámicas, en las cuales la energía es transmitida continuamente al fluido y es utilizada para incrementar su velocidad. La diferencia de velocidad es subsecuentemente convertida en diferencia de presión. La bomba centrífuga, consiste básicamente de una parte móvil, denominada impulsor (*impeller*), montada en un eje rotativo y una parte fija o inmóvil denominada difusor, la cual es una serie de canales donde gradualmente se incrementa el área seccional. Las paletas del impulsor deben moldearse de una forma apropiada, para que su rotación genere el desplazamiento de las partículas de fluido

desde la entrada hacia la zona de descarga. De esta manera dichas partículas son aceleradas, lo cual se traduce en un aumento de su energía cinética. Esta energía es parcialmente convertida en energía potencial (presión) en el impulsor y el difusor.

- **Dependiendo del caudal** que manejan las bombas electrosumergibles pueden ser categorizadas en bombas de flujo radial o mixto. Las bombas de poco flujo son generalmente de flujo radial y pueden alcanzar caudales de aproximadamente 3500 b/d (550 m³/d). Para caudales superiores deben utilizarse bombas de flujo mixto.
- **De acuerdo a su ensamblaje**, existen dos tipos básicos de bombas que son las de construcción “flotante” y las del tipo de “compresión”. Las de construcción “flotante”, donde cada impulsor esta libre para moverse arriba o abajo en el eje. Debido a que los impulsores de estas bombas están libres para moverse, todo el empuje descendente deberá ser soportado por el difusor, por esta razón, este tipo de bombas contiene lo que se denominan “arandelas de empuje”. Estas arandelas manejan todo el empuje generado en los impulsores y también en el eje, distribuyéndolo homogéneamente, debido a esto dichas arandelas deben estar ubicadas entre el impulsor y el difusor. Las del tipo de “compresión”, donde los impulsores están fijos al eje, de manera que no pueden moverse sin movimiento del eje y todo el empuje es soportado en el protector.
- **Dependiendo del diámetro externo de la bomba**, los fabricantes en general tienen una clasificación. En este sentido existan las bombas serie 338, 375, 400, 513, 540, 562, 675, 738, etc., donde el número de la serie representa el diámetro externo de la bomba en pulgadas. Por ejemplo, la serie 338 denota una bomba cuyo diámetro externo es 3.38 pulgadas y así sucesivamente.¹⁰

II.3.2 Componentes de los Sistemas de Bombeo Electrosumergible

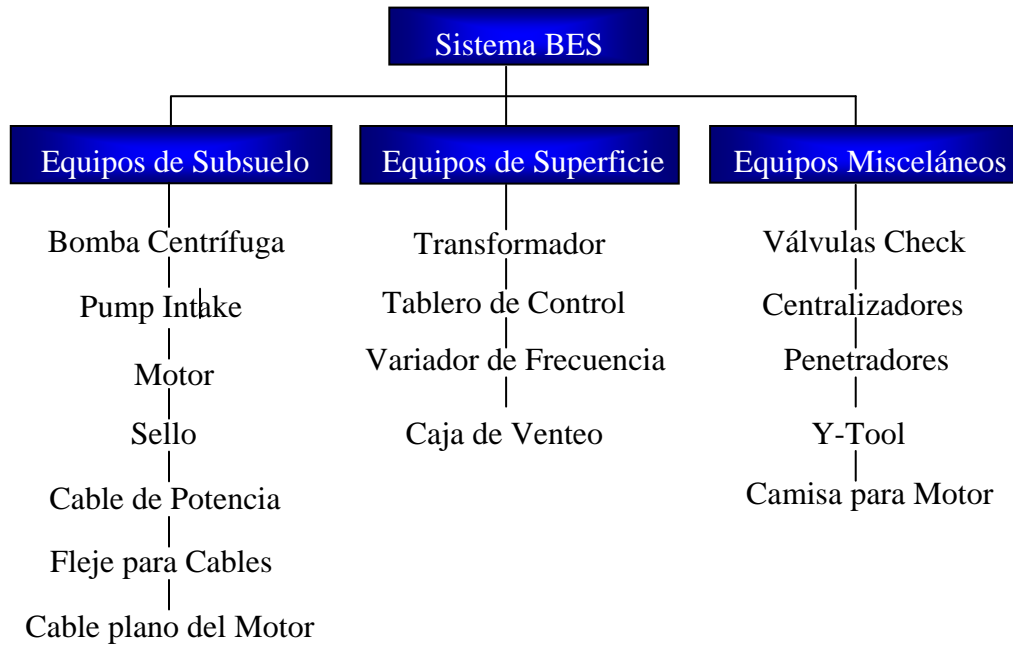


Figura N° 3. Componentes del Sistema BES

II.3.2.1 Equipos de Subsuelo

II.3.2.1.1 Bomba Centrífuga

Las bombas sumergibles son bombas centrífugas de múltiples etapas. Cada etapa de una bomba sumergible consiste de un impulsor rotativo y de un difusor estacionario. El cambio presión-energía es realizado cuando el líquido que está siendo bombeado rodea al impulsor, y mientras el impulsor rota imparte un movimiento rotativo al líquido. En efecto, hay dos componentes de movimiento impartidos al líquido por el impulsor: un movimiento es en una dirección radial hacia fuera del centro del impulsor el cual es causado por la fuerza centrífuga. El otro, se mueve en una dirección tangencial hacia el diámetro exterior del impulsor. El resultado de estos dos componentes es la dirección real del flujo. La función del difusor es cambiar parte de la energía cinética o de alta velocidad en energía

potencial o de presión. La Figura N° 4 muestra la configuración de una bomba centrífuga manufacturada por Centrilift.

El diseño de bombas centrífugas sumergibles cae en dos categorías generales. Las bombas que manejan flujos menores son generalmente de diseño de flujo radial. Nótese que el impulsor descarga el fluido mayoritariamente en dirección radial. Cuando las bombas alcanzan flujos de diseño de aproximadamente 1900 BPD en las bombas de serie 400 y 3500 BPD en las bombas de mayor diámetro, el diseño cambia a uno de flujo mixto. El impulsor en este diseño imparte una dirección al fluido que contiene sustancialmente dirección axial así como dirección radial.

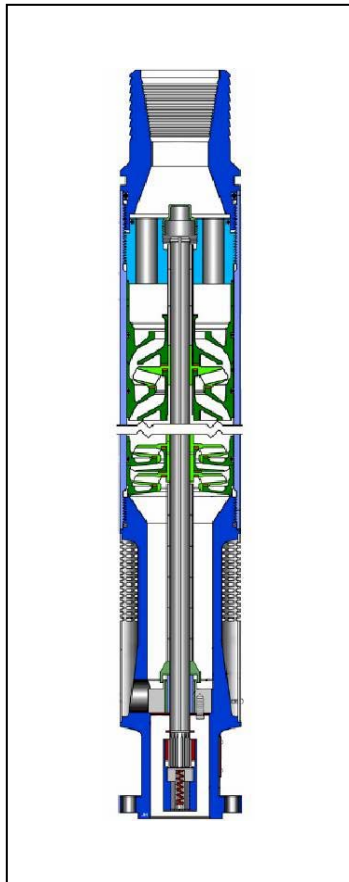


Figura N° 4. Bomba Centrífuga. Centrilift

En mucho de los diseños de bombas, el impulsor está libre para flotar axialmente en el eje y el empuje del impulsor individual de una etapa es absorbido por unas almohadillas especialmente diseñadas que se encuentran en el difusor. Un cojinete de empuje especialmente diseñado contenido en la sección del sello lleva solo el empuje del eje de la bomba. Esta configuración es llamada diseño de etapa flotante. El beneficio de este diseño es que varias etapas pueden estar apiladas sin tener que ajustar los impulsores axialmente en el eje con una alineación precisa. Como resultado, las bombas pueden ser manufacturadas con cientos de etapas individuales.

Cuando el diámetro de la bomba se incrementa más allá de 6 pulgadas (150mm), los impulsores son enganchados al eje de la bomba en la dirección axial y no se absorbe empuje por parte del impulsor que roza en el difusor. Como resultado, el cojinete de empuje contenido en la región del sello, debe cargar el empuje del impulsor y además el empuje del eje. Esta configuración está referida a un diseño de impulsor fijo o bomba de compresión.

Los impulsores son completamente cerrados, con un diseño de paleta curvada, cuya máxima eficiencia es una función del diseño y tipo de impulsor cuya eficiencia de operatividad es una función del porcentaje de capacidad de diseño a la cual la bomba es operada. La relación matemática entre cabezal, capacidad, eficiencia y potencia al freno es expresada como:

$$BHP = \frac{Q \cdot H \cdot \rho \cdot g}{Eff} \quad \text{Ec. 1}$$

donde:

BHP: Potencia al freno (W).

Q: Flujo Volumétrico (m³/s).

H: Cabezal (m)

ρ : Densidad (Kg/m³)

g: Aceleración de gravedad (m/s²)

Eff: Eficiencia de la bomba (adim).

La configuración y diámetro del impulsor de la bomba determinan la cantidad de energía de aceleración que es transmitida al fluido. El diámetro exterior del impulsor está restringido por el diámetro interno de la cubierta de la bomba, el cual a su vez depende del diámetro interno del revestidor del pozo. El diámetro interno del impulsor es dependiente del diámetro exterior del eje, el cual debe ser lo suficientemente fuerte para transmitir potencia a todas las etapas de la bomba. Las bombas centrífugas sumergibles son manufacturadas para varios tamaños de revestidores de pozos.

Las etapas son diseñadas para tener una fuerza de empuje hacia abajo en el impulsor a través de un rango de operatividad. Esta fuerza variaría desde el mínimo al máximo de operatividad. Por lo tanto, la bomba debe ser operada entre el rango de etapas recomendadas para proveer un tiempo de vida óptimo. Las bombas operadas fuera de este rango tendrán una vida reducida y tendrán un efecto de detrimento sobre otros componentes de la BES.

La rapidez de descarga de una bomba centrífuga sumergible, depende de la velocidad rotacional (RPM), diseño de etapa, el cabezal dinámico con el que la bomba está operando, y las propiedades físicas del fluido que es bombeado. El cabezal total dinámico de la bomba es el producto del número de etapas y de cabezal generado por cada etapa.²

II.3.2.1.2 Pump Intake

Dos tipos de tomas son usadas para permitir al fluido entrar a la bomba. Estas son la toma estándar y la toma con separador de gas. Se utiliza una toma con separador de gas cuando el gas libre es mayor de lo que puede ser manejado por la bomba. Si el gas permanece en solución, la bomba se desempeñará normalmente. Sin embargo, una vez que el gas libre exceda ciertos valores la bomba puede generar menos cabezal del normal. Cuando el gas libre se incrementa la bomba puede eventualmente bloquearse por alta presencia de gas, lo que usualmente reduce drásticamente la producción del fluido y en casos extremos puede dañar la bomba.

Hay dos tipos de tomas con separador de gas – la del tipo estática y la de tipo rotativa. El estático induce la separación del gas revirtiendo la dirección del flujo del fluido. En los puertos de entrada del fluido, el flujo en dirección contraria crea menor presión que permita al gas separarse. El gas separado se mueve hacia arriba anularmente y es venteado en la cabeza del pozo. El fluido, el cual contiene todavía algo de gas, entra en el separador y se mueve hacia abajo hacia el “stand tube”. El fluido es levantado por el impulsor levantador rotativo. El impulsor crea un vórtice, el cual fuerza al fluido denso libre de gas al exterior y causa la fuga del gas, levantando al eje. Esto provee a la primera etapa de la bomba con un fluido de mayor densidad que si el gas hubiese fluido a la bomba.¹

En los últimos tiempos, una considerable extensión en la aplicación de BES se ha hecho posible a través del diseño, desarrollo y utilización de separadores de gas rotativos. Estos componentes usan la fuerza centrífuga para separar el gas libre (el gas que no está en solución) del fluido del pozo antes de entrar a la bomba.

En un separador típico rotatorio de gas el fluido entra a éste y es forzado hacia una cámara rotativa centrífuga por la acción de un inductor. Una vez en la cámara, el fluido con la mayor gravedad específica es forzado a la pared externa de la misma por acción de la fuerza centrífuga, dejando al gas cerca del centro. El gas es separado del fluido por el “*cross-over*” y es agotado y llevado al espacio anular del pozo donde procede hacia arriba del mismo. El fluido más pesado es dirigido hacia la toma de la bomba de donde es bombeado hacia la superficie.

El rango de eficiencia típica para separadores de gas dinámicos está entre 80% y 95%. Esta eficiencia se reduce hasta valores de 50% si se incrementa el caudal manejado. La eficiencia del sistema se ve afectada por los volúmenes de fluido, composición y propiedades.²

La Figura N° 5 muestra un separador estático (Vortex) y uno rotativo (Shroud) manufacturados por Centrilift.

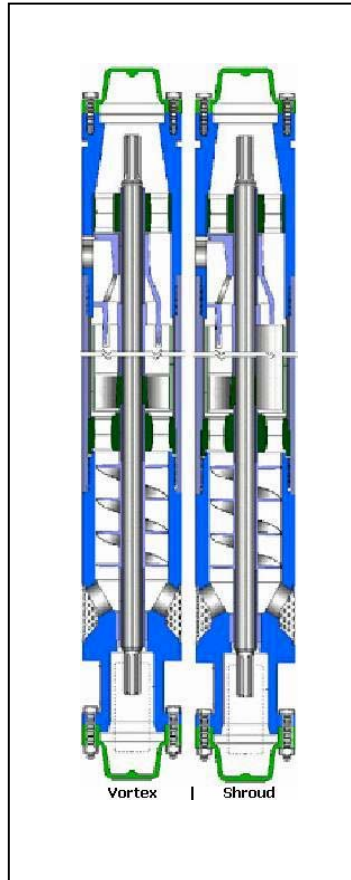


Figura N° 5. Configuraciones de Separadores de gas. Centrilift

II.3.2.1.3 Motor

Los motores eléctricos usados en las operaciones de bombeo electrosumergible son de varios tipos (bipolares, trifásicos, jaula de ardilla y de tipo inducción). Estos motores están llenos con un aceite mineral altamente refinado que provee la resistencia dieléctrica, lubrica los cojinetes del motor y transfiere el calor generado en el motor a la carcasa del mismo. A continuación en la Figura N° 6 se muestra un motor de manufactura típica.

El voltaje de diseño y operación de estos motores pueden ser tan bajo como 230 voltios o tan altos como 5000 voltios. Los requerimientos de amperaje pueden variar de 12 a 200 amperios. La potencia requerida es alcanzada por el simple incremento de la longitud o el diámetro de la sección del motor. Estos motores funcionan a una velocidad relativamente constante de 3500 RPM a 60 Hz. ²

El material estándar de la cubierta del motor es un acero bajo en carbón sin costuras. El material del eje del motor es acero al carbón. Los rotores están soportados sobre una cadena de cojinetes hechos de Nitralloy, que es una aleación. ¹

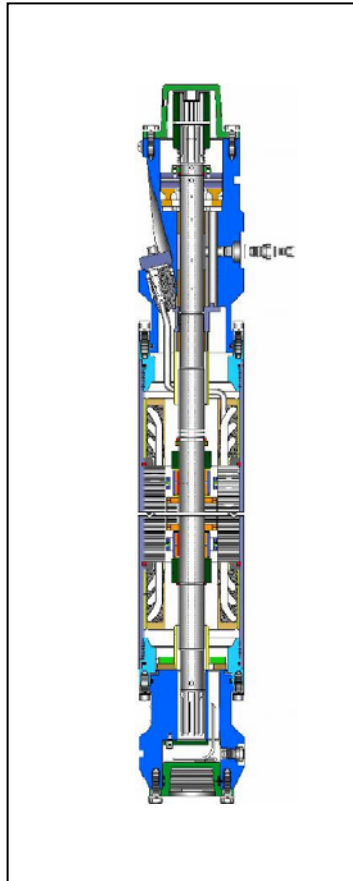


Figura N° 6. Motor de Sistema BES

Los fabricantes presentan una gran disponibilidad de motores en relación con el diámetro del revestidor, por ejemplo: ¹¹

Tabla N° 1. Motores para distintos diámetros de revestidor.

Diámetro Externo Revestidor	H.P Disponibles (60 Hz)
4 1/2''	128
5 1/2''	240
7''	600
8 5/8''	1000

II.3.2.1.4 Sello o Protector

La sección del sello conecta el eje del motor al eje de la bomba o del separador de gas y desempeña las siguientes funciones vitales:

- Permitir la expansión del aceite dieléctrico contenido en la brecha del rotor del motor. Los gradientes de temperatura resultantes tanto del ambiente como del aumento de la temperatura del motor causará que el aceite dieléctrico se expanda. Esta expansión debe llevarse a cabo en el sello.
- Igualar la presión del espacio anular del revestidor con el fluido dieléctrico interno del motor. Esta igualación de presiones a través del motor ayuda a no dejar que el fluido del pozo se escape en las juntas selladas del motor. Los fluidos del pozo que lleguen al motor causarán tempranas fallas dieléctricas.
- Aislar el fluido del pozo del fluido dieléctrico del motor. Como se estableció previamente, la contaminación del aislamiento del motor con el fluido del pozo conducirá a tempranas fallas del aislamiento. El protector contiene múltiples tipos de sellos que previenen que el fluido del pozo llegue al eje. El sello elastomérico o del tipo bolsa provee una barrera positiva al fluido del pozo. Las cámaras de laberinto proveen la separación del fluido, basado en las diferencias de densidades entre el fluido del pozo

y el aceite del motor. Cualquier fluido del pozo que llegue a pasar los sellos superiores del eje o la cámara superior es contenido en las cámaras de laberinto inferiores como medio secundario de protección.

- Absorber el empuje hacia abajo de la bomba. Esto es logrado por un cojinete de empuje deslizante. El cojinete utiliza una película hidrodinámica de aceite para proveer lubricación al cojinete durante la operación. El empuje hacia abajo es el resultado de la presión desarrollada por la bomba a lo largo del área de la sección longitudinal del eje de la bomba y el empuje residual transferido de cada impulsor de etapa individual al eje.²

En la Figura N° 7 se muestra la configuración de un sello o protector de manufactura típica.

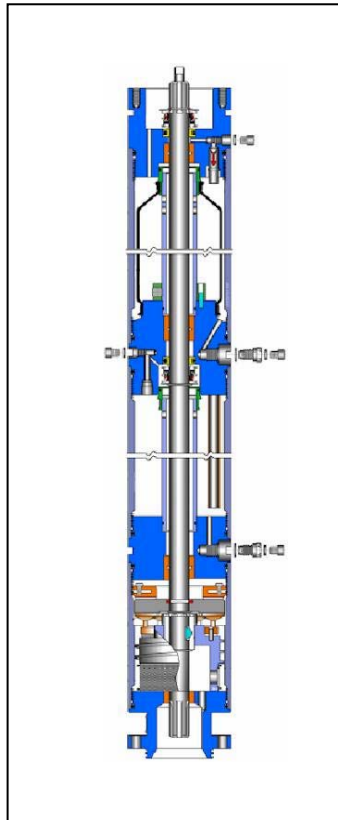


Figura N° 7. Sello o Protector

II.3.2.1.5 Cable de Potencia

La potencia es transmitida al motor sumergible a través de un cable trifásico especial sumergible. Este cable debe ser de poco diámetro, bien protegido del abuso mecánico, resistente al deterioro de sus propiedades físicas y eléctricas causadas por el caliente y agresivo clima del pozo.

Estos cables están disponibles en una amplia variedad de tamaños de conductor, que permiten una eficiente concordancia con los requerimientos del motor. Pueden ser manufacturados ya sea en configuración circular o plana, usando acero galvanizado o una armadura de monel capaz de resistir el ambiente hostil de un pozo. Todos los cables están hechos bajo estrictas especificaciones, usando materiales especialmente formulados para cada ambiente operativo. La construcción de conductores sólidos es recomendada, a pesar que la construcción de conductores trenzados está disponible si así se requiere.² En la Figura N° 8 se muestran las configuraciones de cables de potencia.

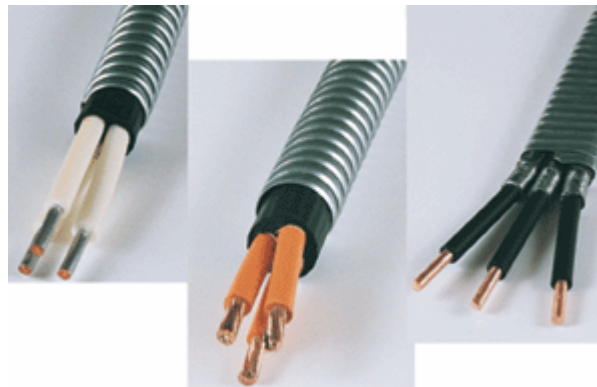


Figura N° 8. Configuraciones de Cables de Potencia.

II.3.2.1.6 Flejes para Cables

Los flejes para cables son usados para atar el cable de potencia a la tubería. Un fleje por cada intervalo de 15 pies (5 m) es usado típicamente. Los flejes de cables son usados

también para atar el cable plano del motor al motor y al sello. El uso de un fleje protegido por cada 18 pulgadas, es recomendado para máximo soporte y protección.

Los materiales básicos usados en la construcción de flejes de cables son acero al carbón, acero inoxidable y monel. Los materiales también varían en ancho y en espesor, proveyendo resistencia y soporte adicional.²

II.3.2.1.7 Cable Plano del motor

El cable plano del motor es la parte más inferior de la cadena del cable de potencia. El cable plano del motor tiene un perfil más bajo que el cable plano estándar de potencia para que así pueda recorrer la longitud de la bomba y del protector en situaciones de separación limitada entre el diámetro externo del equipo y el diámetro interno del revestidor. El cable plano del motor es manufacturado con un terminal llamado “pothead.” La función del “pothead” es permitir la entrada de la potencia eléctrica al motor mientras se sella la conexión y se evita la entrada del fluido del pozo.¹

II.3.2.2 Equipos de Superficie

II.3.2.2.1 Transformador

Los transformadores son unidades sumergidas en aceite y con auto enfriamiento. Están diseñadas para transformar el voltaje primario de la línea eléctrica al voltaje que pueda requerir el motor correspondiente.

Para efectos de diseño la capacidad de carga de los transformadores se calcula en capacidad de carga en potencia aparente expresada en Kilovoltios – Amperios, debido a amplia flexibilidad de los transformadores y a los diferentes voltajes y condiciones en que funcionan, además de la inexactitud del factor potencia que se le aplica (potencia real en Kw).¹¹

II.3.2.2.2 Tablero de Control

El tablero de controles es un equipo que protege y controla el funcionamiento y ensamblaje del fondo. Estos tableros tienen dispositivos de protección contra bajas y altas de amperaje, desconectores de fusibles, registradores de amperajes y reguladores para bombeo intermitente. Se fabrican diferentes tipos de tableros en relación con la potencia del motor y el voltaje secundario requerido por este último.¹¹

II.3.2.2.3 Variador de Frecuencia

Es un tablero de control que contiene dispositivos capaces de suministrar frecuencias y voltajes variables al motor. En la Figura N° 9, se puede apreciar un variador de frecuencia. Dado que la velocidad es directamente proporcional a la frecuencia, las revoluciones por minuto pueden ser controladas desde la superficie. Los principales beneficios que se obtienen con el variador de frecuencia son los siguientes:

1. Permite arrancar los motores a bajas velocidades reduciendo los esfuerzos en el eje de la bomba y componentes del motor. Al arrancar el equipo, la bomba puede operar en un rango por debajo de su frecuencia nominal, lo cual reduce el desgaste y los efectos de abrasión. En el motor se reducen los efectos estrictamente magnéticos en el embobinado.
2. Protege al equipo de fondo de perturbaciones eléctricas; el equipo es tan sensible que cualquier sobre-carga o baja-carga producida en la fuente de alimentación acciona dispositivos de protección que paran el funcionamiento del equipo evitando daño al motor.
3. Permite evaluar el comportamiento de un pozo al fin de obtener el índice de productividad real del mismo.¹¹



Figura N° 9. Variador de Frecuencia.

II.3.2.2.4 Caja de Empalme o Venteo

La caja de empalme, también llamada caja de conexiones o venteo cumple con las siguientes funciones:

1. Permite conectar el cable suplidor de energía del equipo de superficie con el cable de conexión al motor.
2. Permite ventear a la atmósfera cualquier cantidad de gas que fluya a la superficie a través del cable, evitando que llegue al panel lo cual ocasionaría una explosión.
3. Provee de sitios accesibles de prueba para el chequeo eléctrico de le equipo de subsuelo.¹¹

II.3.2.3 Equipos Misceláneos

II.3.2.3.1 Válvulas de Retención

Se usa para mantener la columna de fluido en la tubería de producción cuando la bomba no esta operativa. Debe localizarse de 2 a 3 cuellos (joints) por arriba de la bomba para permitir que el gas sea purgado de la bomba durante el arranque. La válvula check previene que la columna de fluido se regrese a través de la bomba, causando rotación reversa cuando el motor esta apagado.

II.3.2.3.2 Centralizadores

Los centralizadores y guías del motor son diseñados para centrar el sistema de bombeo en el pozo, especialmente en aplicaciones donde los pozos están desviados.

II.3.2.3.3 Penetradores

Son barreras de fluido/presión que se colocan alrededor de los conductores eléctricos para permitir el flujo de potencia eléctrica a través de la empaadura y/o el cabezal.

II.3.2.3.4 Y-tools

Se usan cuando se desea realizar tratamiento o trabajos en el pozo sin extraer el sistema de bombeo o para múltiples instalaciones BES en un pozo. La herramienta permite el paso de una sarta de tubería paralela al sistema de bombeo. Esta tubería sirve como un paso extra para herramientas de registro o tubería continua.

II.3.2.3.5 Camisa para Motor (shroud o motor jacket)

Se utilizan en aplicaciones donde la unidad de bombeo esta asentada bajo las perforaciones o cuando la velocidad del fluido es menor a 1 pie/seg.¹² Con ellas se evita que el crudo entre directamente a la toma y se obliga a pasar a éste por el motor para así enfriarlo.

II.3.3 Configuraciones de BES

II.3.3.1 Impulsor e Inyección

En esta aplicación, una unidad estándar de motor protectora de la bomba, es usada para levantar el fluido de una línea de flujo u otra fuente y simultáneamente proveer presión de inyección a una línea de tuberías. En este tipo de aplicación, la unidad es puesta en un pequeño pedazo de revestidor, usualmente cercano a la superficie. Esta configuración puede ser usada para inyección de agua, aumento de la presión, etc.

II.3.3.2 Toma de fondo y descarga de fondo

En la aplicación de toma de fondo, el fluido del pozo entra en la bomba a través de un dispositivo situado en el fondo de la bomba. La bomba y el motor están invertidos de sus posiciones típicas. Esta configuración es usada donde la separación del revestidor limita los volúmenes de producción debido a las pérdidas por fricción en la tubería de producción o por la interferencia del diámetro del diámetro de la bomba. La bomba con descarga en el fondo es usada típicamente para inyectar agua desde un acuífero poco profundo a una zona de producción más profunda.

II.3.3.3 Configuración de Cubierta

Dependiendo de la configuración exacta, una cubierta puede servir para dos propósitos: (1) dirigir al fluido más allá del motor para enfriarlos y (2) permitir la separación del gas libre del fluido antes de entrar en la toma de la bomba. Esta configuración es usada en pozos de bajo volumen y alta relación gas/crudo.¹

II.3.4 Carta amperimétrica

Es una carta accesorio que se encuentra en el tablero de control en la que se registra el amperaje del motor de la BES. Diversos cambios en las condiciones de operación pueden ser diagnosticados interpretando lo registrado en estas cartas amperimétricas.¹ En la Figura N° 10, se muestra una carta amperimétrica que reporta un comportamiento normal del motor de la BES.

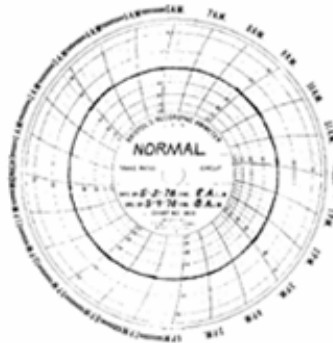


Figura N° 10. Carta amperimétrica

II.3.5 Ventajas del Sistema de BES con respecto a otras metodologías de levantamiento artificial ⁸

- Puede levantar altos caudales en pozos no tan profundos con revestidores grandes.
- Alta eficiencia en producción sobre 1000 BPD.
- Mínimos requerimientos de equipos superficiales.
- Bajo o poco mantenimiento.
- Se puede instalar y adaptar para pozos ligeramente desviados.
- Bajos costos de levantamiento para grandes volúmenes.
- Operación sencilla.
- No representan peligros en zonas urbanas.

II.3.6 Limitaciones del sistema de BES con respecto a otras metodologías de levantamiento artificial ⁸

- La necesidad imprescindible de una fuente de corriente eléctrica y el hecho de trabajar o requerir altos voltajes.
- La posibilidad de reducción de la capacidad de levantamiento de la bomba motivado a la presencia de gas libre superior al 45%.
- Altos costos de inversión.

II.4 EMULSIONES

II.4.1 Definición:

Se llama **dispersión** a un sistema polifásico en el cual una fase se encuentra en forma fragmentada (fase dispersada) dentro de otra (fase continua). Existen varios tipos de

sistemas dispersados y cada uno tiene una denominación particular. Particularmente una dispersión de un líquido en otro inmiscible con él se denomina **emulsión**.

II.4.2 Generalidades sobre emulsiones.

En realidad es a veces difícil lograr una combinación de propiedades definidas a priori al momento de formar emulsiones, puesto que las propiedades no son siempre independientes las unas de las otras. En la situación actual, el problema científico/técnico es lograr obtener las propiedades deseables mediante el ajuste o la manipulación de las variables disponibles, a saber, las de formulación (naturaleza de los componentes), las de composición (proporciones relativas de los diferentes ingredientes), así como aquellas variables flujo-mecánicas que permitan describir las condiciones del proceso de agitación-mezclado generalmente requerido para producir una dispersión. El problema es complicado porque estas variables no son independientes, y a menudo contribuyen a producir efectos opuestos.

Basta examinar lo que ocurre a una gota que circula dentro de un tanque agitado. Cuando pasa cerca del aspa del impulsor está sometida a un fuerte cizallamiento que depende de la forma y de la velocidad de rotación del impulsor (entre otras cosas). El resultado de este cizallamiento puede ser un estiramiento más o menos pronunciado dependiendo de la tensión interfacial, la cual depende de la adsorción de surfactante y por tanto de la formulación en general, pero que depende también de la viscosidad de los fluidos (una propiedad física), y de la presencia de otras gotas en la cercanía (composición). La combinación de estos efectos con la intensidad y la duración del cizallamiento produce o no la ruptura en dos o más gotas. Luego de alejarse de las aspas, la gota está "viajando" cerca de sus vecinas con una velocidad relativa muy pequeña y puede por tanto producirse la coalescencia. Este fenómeno depende del tamaño de las gotas, de la cantidad de gotas presentes (composición), de la facilidad con la cual se puede desplazar (viscosidad del medio), de la repulsión al acercarse (formulación), de la temperatura (que puede afectar la formulación y la viscosidad), de patrón de flujo, de la velocidad de flujo etc. Obviamente el tamaño de las gotas producidas depende del equilibrio dinámico entre del equilibrio

dinámico entre la ruptura y la coalescencia, el cual depende de decenas de variables y de combinaciones.¹³

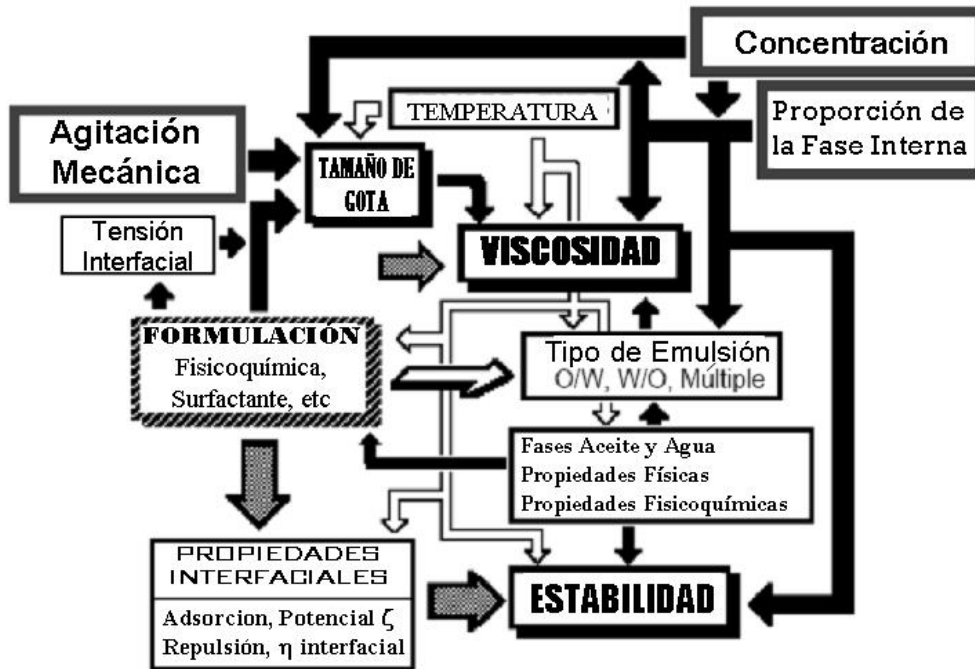


Figura N° 11. Interrelaciones de causa a efecto entre variables, fenómenos y propiedades de las emulsiones.

En la Figura N° 11, se puede observar lo complejo y complicado que resulta la formación y preparación de emulsiones, que fue lo expuesto en los párrafos anteriores de este mismo apartado.

II.4.3 Composición de una emulsión

La emulsión es estabilizada por un agente surfactante llamado emulsionante. La noción de estabilidad es por supuesto relativa, pero se refiere a una casi ausencia de cambio durante un período de tiempo suficientemente largo para el propósito de la aplicación práctica, lo cual puede variar de algunos minutos a algunos años.

En ausencia de surfactante, la dispersión líquido-líquido coalesce rápidamente (ejemplo aceite y vinagre). En presencia de un agente emulsionante, la emulsión puede presentar una cierta segregación gravitacional pero la coalescencia de las gotas es notablemente retardada, aun cuando se tocan (ejemplo de la mayonesa).

Las cantidades relativas de fase dispersa y de fase continua (referidas también como fase interna y fase externa) influyen notablemente sobre las propiedades. Debajo de 20% de fase interna se habla de una emulsión de bajo contenido de fase interna.

En tales emulsiones se puede considerar que hay poca o ninguna interacción de las gotas entre sí, lo que permite predecir ciertos comportamientos.

Al otro extremo están las emulsiones de alto contenido de fase interna, en las cuales las gotas de la fase interna ocupan más del 60-70% del volumen. En tales emulsiones las interacciones entre gotas dominan los efectos. Más allá de 75%, las gotas están literalmente al contacto y la emulsión se torna muy viscosa.

La concentración del agente emulsionante es variable, pero en la práctica existen dos límites. Debajo de una concentración mínima del orden de algunos miles de ppm (0,1% por ejemplo), no hay bastante emulsionante para estabilizar la emulsión. Más allá de algunos por cientos (5% por ejemplo), no se gana nada aumentando la concentración del surfactante.

En las aplicaciones prácticas se encuentra una concentración de emulsionante en el rango 0,2 - 3%. Por razones de eficiencia y de costo se usa en general un emulsionante compuesto de una mezcla de varios surfactantes.

II.4.4 Clasificación de las emulsiones según la naturaleza de la fase interna

En muchas emulsiones de crudo y agua el agua está finamente dispersa en el crudo. La forma esférica de los glóbulos de agua es un resultado de la tensión interfacial, la cual las obliga a tener el área superficial más pequeña posible para el aceite. Esto es una emulsión de agua en crudo (w/o) y se refiere a ella como una emulsión *normal*. El crudo puede estar disperso en el agua, lo que forma una emulsión de crudo en agua (o/w), a la que se refiere como una emulsión *inversa*.

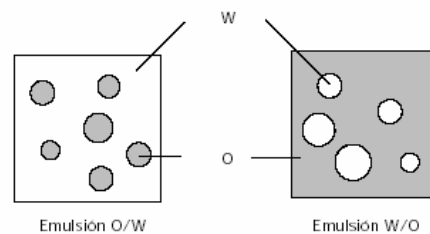


Figura N° 12. Diferentes tipos de emulsiones

II.4.5 Como se forman las emulsiones

La formación de emulsiones es básicamente un proceso no espontáneo. En el proceso de dispersar una fase en otra, bien sea formando una macroemulsión o una microemulsión, el cambio de energía libre asociado viene dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta G = \Delta A \cdot \gamma - T \cdot \Delta S \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

ΔG : cambio en la energía libre debido a la formación de gotas (J).

ΔA : incremento en el área interfacial generada por el proceso de emulsificación (m²).

γ : tensión interfacial (J/m²).

T : temperatura de trabajo (K).

ΔS : cambio de entropía durante el proceso (J/K).

Por lo general en la formación de las emulsiones el término entrópico es despreciable en comparación al de la tensión interfacial, por lo tanto la ecuación 2 puede escribirse como:

$$\Delta G = \Delta A \cdot \gamma \quad \text{Ec. 3}$$

El área interfacial aumenta en la formación de una emulsión, ΔA es positiva, por lo cual, de acuerdo a la ecuación 3, ΔG también es positivo. Esto significa que desde el punto de vista termodinámico las emulsiones son sistemas inestables.

El surfactante, disminuye la tensión interfacial (γ) entre las fases en estudio de tal manera de contrarrestar el aumento del área y disminuir la energía necesaria para formarla. Una vez formada la emulsión, el surfactante también actúa como estabilizador creando una barrera energética contra la coalescencia y por lo tanto evitando la separación de fases y la ruptura de la emulsión.

Durante el proceso de formación de emulsiones puede ocurrir simultáneamente el rompimiento de las gotas y la coalescencia de las mismas, determinando el tamaño de la gota resultante. Cada uno de estos procesos está gobernado por una cinética que dependerá del tipo de mezclado y propiedades de las fases.

Las tres condiciones necesarias para que se formen las emulsiones son (1) los dos líquidos que forman la emulsión deben ser inmiscibles, (2) debe haber suficiente agitación para dispersar un líquido como gotas en otro, y (3) debe haber un agente emulsificante presente. El petróleo y el agua son inmiscibles. Si delicadamente se ponen en el mismo contenedor, se separarán rápidamente. Si el crudo y el agua son violentamente agitados, gotas pequeñas de agua se dispersarán en la fase continua de crudo.

La agitación necesaria para formar una emulsión puede resultar de cualquiera o por una combinación de muchas fuentes: (1) la bomba en el fondo del pozo, (2) el flujo a través de la tubería de producción, el cabezal, el múltiple o las líneas de flujo, (3) las bombas de

transferencia en la superficie, o (4) la caída de presión a través de chokes, válvulas u otro equipo de superficie. Mientras mayor sea la cantidad de agitación. Más pequeñas serán las gotas de agua dispersas en el crudo.

El crudo puede variar en sus tendencias emulsificantes. Algunos pueden formar emulsiones muy estables que son difíciles separar, mientras que otros pueden ser que no se emulsifiquen o formen una emulsión débil que se separará rápidamente. La presencia, cantidad, y naturaleza de un agente emulsificante determinarán si se forma una emulsión y la estabilidad de esa emulsión. Si el crudo y el agua no contienen agentes emulsificantes, el crudo y el agua pueden formar una dispersión que se separará rápidamente debido a la rápida coalescencia de las gotas dispersas. Por otro lado, si un agente emulsificante está presente en el crudo, se puede formar una emulsión muy estable.

II.4.6 Agentes Emulsificantes

Los agentes emulsificantes son compuestos de superficie activa que fija la superficie de la gota de agua y reduce la tensión interfacial entre el crudo y el agua. Cuando se le agrega energía a la mezcla debido a la agitación, las gotas de la fase dispersa se rompen en gotas más pequeñas. Mientras menor es la tensión interfacial, menor debe ser la cantidad de energía suministrada para la emulsificación.

Hay muchas teorías sobre la naturaleza de los agentes emulsificantes en las emulsiones en crudos. Se piensa que algunos emulsificantes son de naturaleza asfáltica. Ellos están en el petróleo y son fuertemente atraídos por el agua. Tales emulsificantes salen de la solución y se fijan a sí mismos en las gotas de agua cuando éstas están dispersas en el crudo. Dichos emulsificantes forman películas gruesas que rodean a las gotas de agua y evitan que las superficies de las gotas de agua se contacten entre sí, así se evita la coalescencia cuando las gotas chocan.¹⁴

Todas las emulsiones de crudo son dinámicas y transitorias. La energía interfacial por unidad de área en las emulsiones de petróleo es mucho más alta en comparación con otras emulsiones industriales. Por ello, ellas son termodinámicamente inestables en el sentido que si el agua dispersa coalesciera y se separara, el total de energía libre decrecería. Solo la presencia de una película de emulsificante introduce una barrera de energía que evita que se lleve a cabo el rompimiento o proceso de separación.

Las características de una emulsión cambian continuamente desde el tiempo de formación al instante de completa resolución. Esto ocurre debido a que hay numerosos tipos de materiales adsorbentes en un crudo dado. También, la velocidad de adsorción de la emulsión y la permanencia de locaciones en la interfase puede variar cuando el fluido fluye a través del proceso. Además, las características de las emulsiones son cambiadas cuando el líquido está sujeto a cambios en temperatura, presión y grado de agitación.¹

II.4.6.1 Surfactantes Naturales

El crudo, especialmente el crudo pesado, contienen grandes cantidades de asfaltenos (componentes polares de alto peso molecular) que actúan como emulsificantes naturales. Otros componentes del crudo son también surfactantes: resinas, ácidos como los ácidos nafténicos, porfirinas, cristales de cera, entre otros, pero la mayoría de las veces ellos solos no pueden producir emulsiones estables. Sin embargo, se pueden asociar a los asfaltenos y afectar la estabilidad de la emulsión. Las resinas solubilizan a los asfaltenos en el crudo y los remueven de la interfase, por lo tanto disminuyen la estabilidad de la emulsión. Las ceras se absorben en la interfase y aumentan la estabilidad. Los ácidos nafténicos y otros ácidos aparentemente son incapaces de estabilizar emulsiones por sí mismos.¹⁵ El crudo venezolano es rico en ácidos nafténicos, estos ácidos poseen un grupo no polar que los hace muy afín al crudo en sí. Esta afinidad va a provocar que sea el agua la que se disperse en el crudo. Los asfaltenos van a actuar como una capa que va a envolver a la gota dándole así mayor estabilidad a la emulsión ya que esta capa va impedir la coalescencia de las gotas de agua.

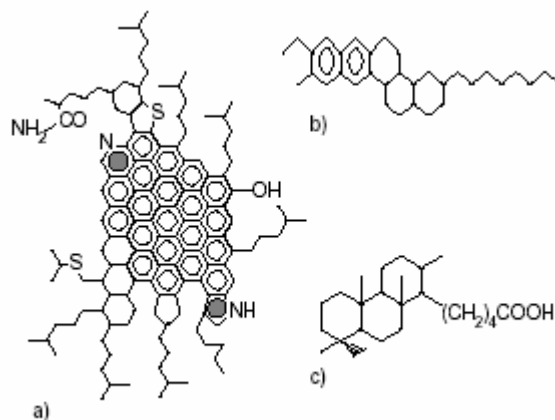


Figura N° 13. Ejemplos de estructuras moleculares.

a) Asfalteno. b) Resina. c) Ácido nafténico

II.4.6.2 Sustitutos de los Surfactantes Naturales

II.4.6.2.1 TOFA

La TOFA (Tall Oil Fatty acids) es un compuesto derivado del aceite de pino y está constituido principalmente por ácido oleico y ácido linoleico. Esta sustancia puede actuar como sustituto de los surfactantes naturales del crudo cerro negro, ya que su composición química le da características muy similares.¹⁶

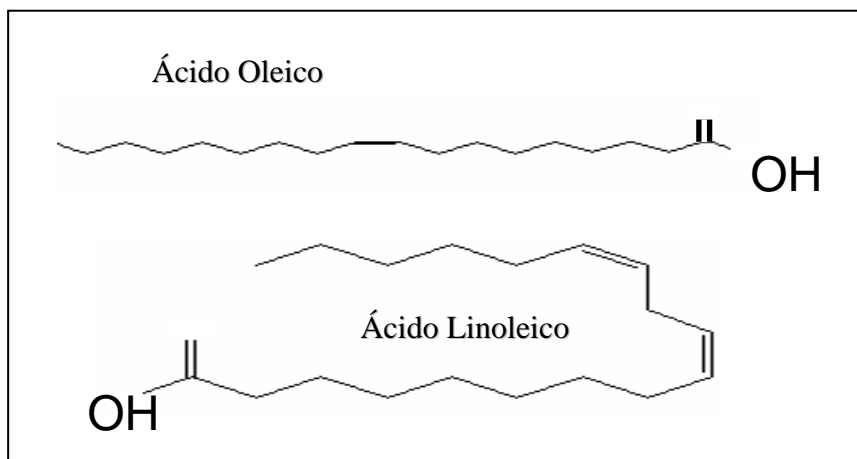
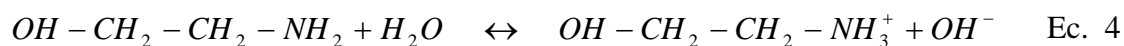


Figura N° 14. Compuestos Principales de la TOFA

II.4.6.2.2 Formación de Carboxilatos

La TOFA en su forma ácida posee pocas propiedades de surfactantes, por lo tanto se hace necesario buscar una sustancia que posea mayor actividad interfacial, por eso a la fase acuosa de la emulsión se puede agregar una amina orgánica como la MEA (mono etanol amina) que va a permitir ionizar el agua y producir radicales oxidrilos (OH^-) que van a aumentar el pH de la fase acuosa. Cuando el agua se pone en contacto con la fase orgánica es posible la promoción de carboxilatos (sal de TOFA), el conjunto TOFA y su sal va a poseer mayor actividad interfacial y va a migrar más fácilmente a la interfase y así se consigue mayor estabilidad en las emulsiones formadas. A continuación se muestran las ecuaciones químicas relacionadas a la formación de carboxilatos:



II.4.7 Demulsificación

La demulsificación es el rompimiento de una emulsión en una fase acuosa y en otra conformada por el crudo. Desde el punto de vista de proceso, el productor de crudo está interesado en dos aspectos de la demulsificación (a) la rapidez o velocidad a la cual se lleva a cabo la separación y (b) la cantidad de agua remanente en el crudo después de la separación. Una alta rapidez de separación y un bajo valor en el agua remanente en el crudo es obviamente lo que el productor quiere.

II.4.8 Desestabilización de Emulsiones

Las emulsiones en general, entre ellas las producidas en campo poseen un grado de estabilidad cinética. Esta estabilidad proviene de la formación de películas interfaciales que encapsulan las gotas de agua. Para separar estas emulsiones, la película interfacial tiene que ser destruida y hacer que las gotas coalescan. Por lo tanto la desestabilización y el

rompimiento de la emulsión están ligados muy íntimamente con la remoción de esta película interfacial. Los factores que aceleran el rompimiento de la emulsión incluyen:

- Incremento en la temperatura.
- Reducción en la agitación
- Incremento en el tiempo de residencia
- Remoción de sólidos
- Control de agentes emulsificantes

II.4.9 Mecanismos involucrados en la Demulsificación

La demulsificación es la separación de una emulsión en sus dos fases componentes. Es un proceso que se da en dos pasos. El primer paso puede darse por la floculación (o agregación, o aglomeración o coagulación) o por la sedimentación (o creaming). El segundo paso es la coalescencia. Cualquiera de estos pasos puede ser determinante en la velocidad del proceso de rompimiento de la emulsión.

II.4.9.1 Sedimentación:

Ocurre la separación de las fases debido a la diferencia de densidades entre las mismas y el tamaño de las gotas de la fase continua. Durante la sedimentación o “Creaming” se forman dos capas, una de las cuales es concentrada en la fase dispersa, y otra diluida en la misma.

II.4.9.2 Floculación o Agregación

Durante la floculación las gotas se aglutinan formando agregados o flóculos. Las gotas están cerca las unas de las otras, inclusive se tocan en ciertos puntos, pero no pueden perder su identidad y por lo tanto no pueden coalescer. La coalescencia en esta etapa sólo sucede si la película interfacial que rodea a las gotas de agua es muy débil. La velocidad de floculación depende de un número de factores en los que se incluye corte de agua, temperatura viscosidad del crudo, y la diferencia de densidad entre el crudo y el agua.

II.4.9.3 Coalescencia

La coalescencia es el segundo paso en el proceso de demulsificación y se da luego de la floculación. Durante la coalescencia las gotas de aguas se fusionan o coalescen juntas para formar una gota más grande. Este es un proceso irreversible que conduce a una disminución en el número de gotas de agua y eventualmente a una demulsificación completa. La coalescencia se ve favorecida por una alta velocidad de floculación, por la ausencia de películas mecánicamente fuertes, altas tensiones interfaciales, viscosidades interfaciales y viscosidades del crudo bajas, altos cortes de agua, altas temperaturas.¹⁷

A continuación en la Figura N° 15, se muestra esquemáticamente como son los procesos de desestabilización de emulsiones:

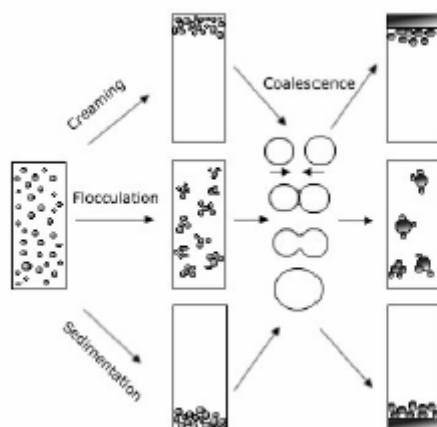


Figura N° 15. Procesos que acarrear el rompimiento de una emulsión

II.4.10 Comportamiento de las emulsiones bajo cizallamiento

Las emulsiones son fracciones segregadas discretamente ya sea de la fase polar o de la fase no polar, que están dispersas a lo largo de un sistema de polaridad opuesta. Estas entidades discretas contienen fluidos que exhiben características de densidad, viscosidad, punto de fusión, punto de ebullición, presión de vapor y tensión superficial que pueden ser

similar o ampliamente diferente a las propiedades de la fase envoltoria. Cada agregado de la emulsión, por lo tanto, se presenta a sí mismo como una discontinuidad dentro de un sistema. La amplitud con que la fase interna difiere de la fase externa y el número de discontinuidades determinan la resistencia al cizallamiento que el sistema va a exhibir.

Afortunadamente en los sistemas de emulsiones de crudo, la fase polar es usualmente agua la cual contiene distintas concentraciones de iones, y el fluido exhibe características ligadas íntimamente a la del agua. Esto no es cierto en las fracciones de la fase no polar, es decir, en la fase de crudo. Estas fracciones generalmente sí exhiben propiedades muy variables. Muchas veces un crudo liviano con viscosidad menor a la del agua contiene una emulsión de agua, y el agregado incrementa significativamente el perfil de cizallamiento del sistema. Por otro lado, un crudo pesado con una viscosidad mucho mayor a la del agua contienen una emulsión de agua, y el efecto del agregado es la reducción del perfil de cizallamiento del sistema. En ambos casos, el perfil del cizallamiento, cuando es graficado versus la tasa de corte, produce curvas que se desvían de la suavidad, y la magnitud de tales desviaciones es una medida de los efectos de los agregados de las emulsiones.

Dos factores que determinan si estos sistemas exhiben o no comportamiento dilatante (disminución de la viscosidad aparente a medida que aumenta la tasa de corte) o thixotrópico (aumento de la viscosidad aparente a medida que aumenta la tasa de corte) incluyen la concentración de emulsificantes bipolares presentes en la interfase y la presión de vapor de equilibrio de la fase interna. En el caso de la concentración del emulsificante bipolar existe una posibilidad para que la emulsión multi-capa para distribuir al emulsificante bipolar cuando el sistema esta sujeto a fuerzas de cizallamiento. Esta redistribución podría resultar en un promedio mayor de tamaño de emulsión, y por lo tanto una mayor viscosidad del sistema. En el caso de la presión de vapor de equilibrio, las fuerzas de cizallamiento que producen mayor tamaño de emulsión promedio pueden temporalmente cambiar la concentración de la fase interna y producir un gradiente de difusión entre los agregados de la emulsión.¹⁸

II.5 VISCOSIDAD DE LAS EMULSIONES

II.5.1 Definición de Viscosidad

La **viscosidad** es la propiedad que caracteriza la resistencia de un fluido a desplazarse. Se define la viscosidad a partir de un caso simple en el cual un fluido se ubica entre dos láminas paralelas distantes de "y" (Figura N° 16). Una de las láminas se mantiene fija, mientras que la otra se pone en movimiento (paralelamente a la primera) al aplicarse una fuerza F. Siendo "V" la velocidad de la lámina y "A" el área correspondiente se obtiene la relación:

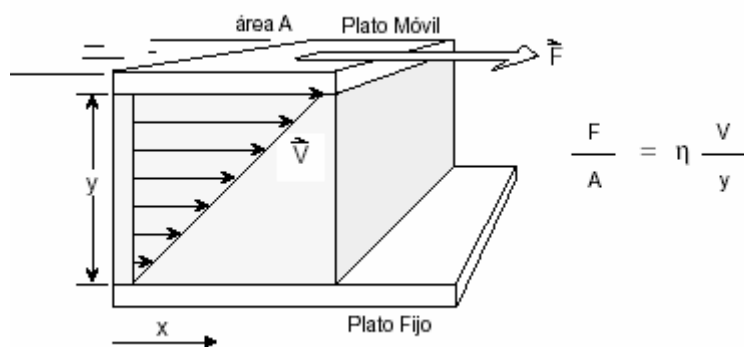


Figura N° 16. Gráfica definiendo el concepto de viscosidad η

A partir de este caso llevado al límite (diferencial) se deriva una fórmula más general.

$$\tau_{xy} = \eta \frac{dv_x}{dy} \quad \text{Ec. 6}$$

donde τ es el **esfuerzo** ejercido en la dirección x sobre una superficie a "y" constante por el fluido ubicado a menores valores de "y". Por otra parte v_x representa el componente en la dirección x de la velocidad. Su derivada respecto a "y" es el gradiente de velocidad llamado **velocidad de deformación o cizallamiento**.

$$v_x = \frac{dx}{dt} \quad \text{Ec. 7}$$

$$\frac{dv_x}{dy} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dy} \right) \quad \text{Ec. 8}$$

El significado del tensor de esfuerzo τ es siempre difícil de comprender en su forma original. Se puede utilizar la ecuación 4 para deducir un significado más fácil de entender.

En la vecindad de $y = 0$, cerca de la superficie en movimiento, el fluido adquiere una cierta cantidad de movimiento. Al desplazarse este fluido, provoca el desplazamiento de otra capa más alejada y así sucesivamente. En consecuencia, la cantidad de movimiento o momento en la dirección x se transmite en la dirección y .

En unidades cgs, el esfuerzo es una fuerza por unidad de área (dina/cm^2) y por lo tanto la viscosidad tiene como unidad el $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$ ó POISE (en honor del científico francés Poiseuille). El agua tiene una viscosidad del orden de 0,01 poise ó 1 centipoise (cP) que es la unidad más utilizada en la práctica. Es equivalente a la unidad mPa.s en unidades SI.

Para ciertas aplicaciones se define la viscosidad cinemática ν como la relación entre la viscosidad y la densidad. En unidades cgs se expresa la viscosidad cinemática en cm^2/seg ó STOKES; el agua tiene una viscosidad cinemática del orden de 0,01 St ó 1 centistoke (cSt).

II.5.1.1 Viscosidad Aparente

El cociente del esfuerzo de corte a la velocidad de corte de un fluido no newtoniano, tal como la grasa lubricante, calculado de la ecuación de Poiseuille y medido en poises. La viscosidad aparente cambia con diferentes razones de corte y temperatura y, por lo tanto, debe ser reportado como el valor a una razón de corte y temperatura dadas¹⁹

II.5.2 Reología

La reología (del griego rheo = derramarse) es la rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos sometidos a diferentes tipos de esfuerzos. Para tales estudios

se usan aparatos llamados reómetros, que para los fluidos permiten graficar la relación entre el esfuerzo y el cizallamiento.

Si existe una relación lineal entre el esfuerzo y el cizallamiento, se dice que el fluido es **newtoniano**; es el caso de la mayoría de los fluidos simples, pero no de las emulsiones o suspensiones, las cuales presentan a menudo un comportamiento llamado **pseudoplástico**. Tal comportamiento se caracteriza por una disminución de la viscosidad a medida que el cizallamiento aumenta. En tal caso se debe especificar las condiciones de cizallamiento cuando se indica un valor de viscosidad.

II.5.3 Factores determinantes de la Viscosidad de las Emulsiones

La viscosidad de una emulsión depende de numerosos factores, algunos con carácter físico más o menos determinado, otros de tipo físico-químico cuyo efecto empieza solamente a entenderse. A continuación se presenta una lista de estos factores:

- 1) Viscosidad de la fase externa (η_o).
- 2) Proporción volumétrica de la fase interna (\emptyset).
- 3) Tamaño de las gotas de la fase interna.
- 4) Viscosidad de la fase interna. (η_i).
- 5) Efectos electro-viscosos.
- 6) Efecto del emulsionante, es decir de la formulación.

II.5.3.1 Viscosidad de la Fase Externa

Todos los modelos teóricos o empíricos indican una relación de proporcionalidad entre la viscosidad de la emulsión y la viscosidad de la fase externa, la cual contiene en general el agente emulsionante.

Tal relación es obvia a baja proporción de fase interna, cuando la presencia de las gotas de la fase interna produce sólo una interacción adicional.

$$\eta = \eta_o \cdot f(x) \quad \text{Ec. 9}$$

donde $f(x)$ representa los demás efectos.

Sin embargo, a alto contenido de fase interna ($\emptyset > 70\%$) es probable que tal relación ya no sea válida y eso por dos razones. Primero, la estructura de la fase externa es extremadamente fraccionada y no puede responder a los esfuerzos de manera normal, y segundo, el sistema es altamente no-newtoniano y por lo tanto se mide solo una viscosidad aparente promedia, que varía con el cizallamiento.

II.5.3.2 Proporción de la Fase Interna

La proporción de la fase interna es obviamente un factor de primera importancia en la viscosidad de los sistemas dispersos tanto en emulsiones como en suspensiones sólidas. En efecto, es perfectamente razonable desde el punto de vista intuitivo considerar que a mayor contenido de gotas, mayor interacción entre las mismas y por lo tanto mayor viscosidad.

Cuando una gota o una partícula se encuentra en un gradiente de velocidad, está sometida a un par de fuerzas que la hacen girar. Este fenómeno resulta en una dispersión adicional de energía, que Eistein calculó, llegando a la siguiente expresión de viscosidad:

$$\eta = \eta_o (1 + 2,5\emptyset) \quad \text{Ec. 10}$$

Esta expresión es válida solo para $\emptyset < 0.02$ (2 %), es decir, en el caso en que no existen interacciones de las gotas entre sí, sino sólo interacciones entre gota y fase externa. Es por lo tanto una ley límite (Figura N° 17) de poco interés en los problemas prácticos.

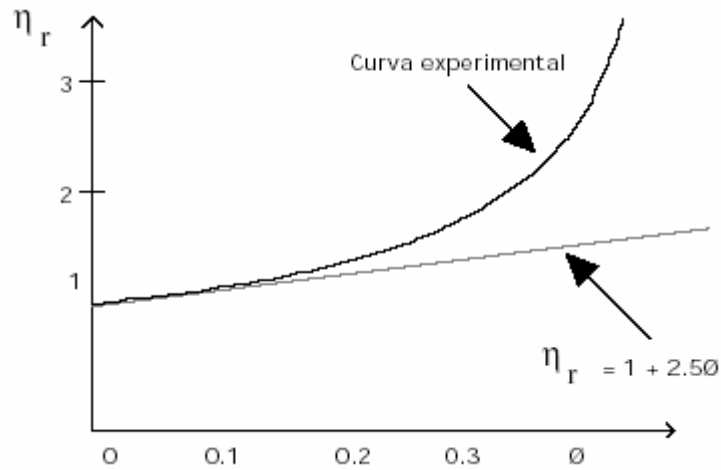


Figura N° 17. Variación de la viscosidad relativa con el contenido de fase interna

Se definen varias viscosidades:

$$\eta_r = \eta / \eta_0 \quad \text{Ec. 11}$$

Viscosidad relativa.

$$\eta_{\text{esp}} = \eta_r - 1 \quad \text{Ec. 12}$$

Viscosidad específica.

$$\eta_{\text{int}} = \eta_{\text{esp}} / \emptyset \quad \text{Ec. 13}$$

Viscosidad intrínseca.

Cuando \emptyset tiende a cero: $\eta_r \rightarrow 1$ y $\eta_{\text{int}} \rightarrow 2.5$

La experiencia muestra que la viscosidad de una emulsión aumenta con \emptyset como un polinomio para valores de \emptyset intermedios y luego como una exponencial para altos valores de \emptyset (Figura N° 18). Para mostrar tales resultados se han propuesto varias relaciones empíricas:

$$\eta_r = 1 + A\emptyset + B\emptyset^2 + C\emptyset^3 \quad \text{Ec. 14}$$

$$\eta_r = \exp(k\emptyset) = \exp(k\emptyset + A) \quad \text{Ec. 15}$$

$$\log \eta_r = \frac{A\emptyset}{1 - B\emptyset} \quad \text{Ec. 16}$$

donde A, B y C son variables experimentales adimensionales y que van a depender de cada emulsión en sí

En realidad la precisión de estas relaciones empíricas no puede determinarse porque al aumentar el contenido de fase interna, la emulsión se torna siempre pseudoplástica y por lo tanto la viscosidad varía con el cizallamiento.

Para fines prácticos se puede por lo tanto, usar cualquier tipo de relación, incluidas aquellas que poseen una asíntota, es decir un valor de ϕ para el cual la viscosidad crece hasta el infinito:

$$\eta_r = \frac{(1 + A\phi + B\phi^2 + \dots)}{(1 + m\phi)^n} \quad \text{Ec. 17}$$

Esta asíntota tiene cierto sentido físico; en efecto, la emulsión siempre se invierte más allá de un cierto contenido de fase interna (Figura N° 18). Sin embargo, este punto de inversión depende de la distribución de tamaño de gotas y del método de formación de la emulsión. No es, por ejemplo, lo mismo fabricar una emulsión O/W con 80% de fase a partir de los dos fluidos en la relación dada, o a partir de una emulsión O/W existente que contiene ya un 70% de O.

Una expresión que parece más ajustada es la propuesta por Pal y Rhodes, la cual hace uso de un valor experimental obtenido en las mismas condiciones de formulación y agitación. Este parámetro experimental ϕ_{100} es el valor de la fracción de fase interna para el cual la viscosidad relativa es igual a 100.

$$\eta_r = \left(1 + \frac{\phi/\phi_{100}}{1,187 - \phi/\phi_{100}} \right)^{2,49} \quad \text{Ec. 18}$$

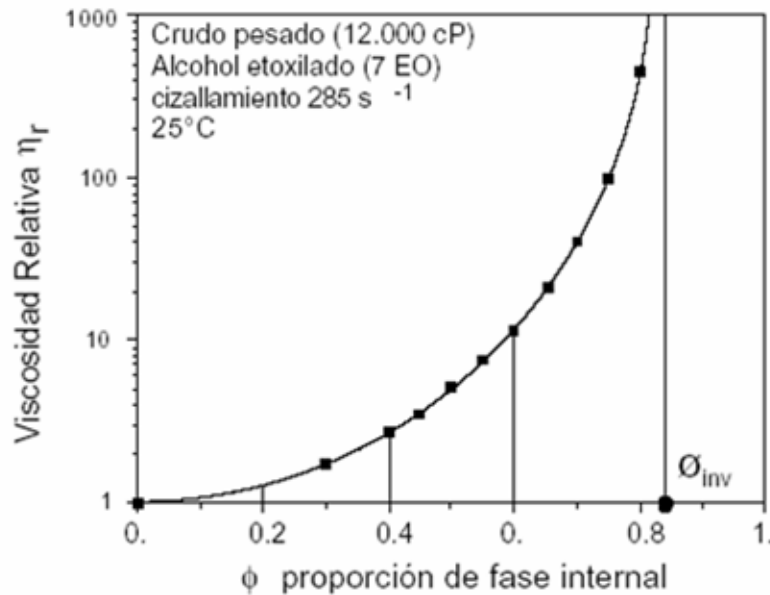


Figura N° 18. Efecto de la proporción de fase interna para varias emulsiones de crudo pesado en agua

II.5.3.3 Tamaño de Gotas

Ambos, tamaño de gotas y distribución de tamaño de gotas tienen una influencia sobre la viscosidad de las emulsiones. Sin embargo es prácticamente imposible estudiar estos factores independientemente, ya que para variar dicho tamaño o distribución se deben variar otros factores como la tensión interfacial o el tipo y la concentración de surfactante.

Sin embargo el estudio con partículas sólidas de látex de tamaño muy bien definido permite corroborar las tendencias observadas con las emulsiones.

- Cuando menor el tamaño de gota, mayor la viscosidad.
- Cuando más amplia la distribución de tamaño de gota (polidispersidad), menor la viscosidad.

Existen numerosos resultados que tienden a mostrar una relación del tipo:

$$\log \eta = A + B / d_m \quad \text{Ec. 19}$$

donde d_m es el tamaño promedio de gotas, y B vale aproximadamente -1 . A es un valor empírico y adimensional.

Sin embargo esta relación no se aplica al caso de gotas deformables, lo que ocurre en presencia de una baja tensión interfacial.

La polidispersidad se refiere, no solo a la amplitud de la distribución, sino también a su forma. Cuando se mezclan dos emulsiones de mismo contenido de fase interna pero de tamaños muy diferentes, la distribución resultante presenta dos picos; se dice que es una emulsión bimodal. Si estos dos picos son suficientemente separados se puede obtener una reducción considerable de la viscosidad, la cual se debe a que las gotas pequeñas se ubican entre las grandes.

La Figura N° 19 ilustra este fenómeno. Nótese que la emulsión de gotas más finas posee una viscosidad mayor que aquellas de gotas más grandes; sin embargo la diferencia no es muy grande porque la distribución de tamaño de gotas de una emulsión más fina es más polidispersa que la distribución de tamaño de gotas de la emulsión gruesa. Al mezclar las dos emulsiones (de mismo contenido de fase interna) en diferentes proporciones se puede obtener una emulsión que presenta un mínimo de viscosidad (menor que la viscosidad de cualquiera de las emulsiones de base).

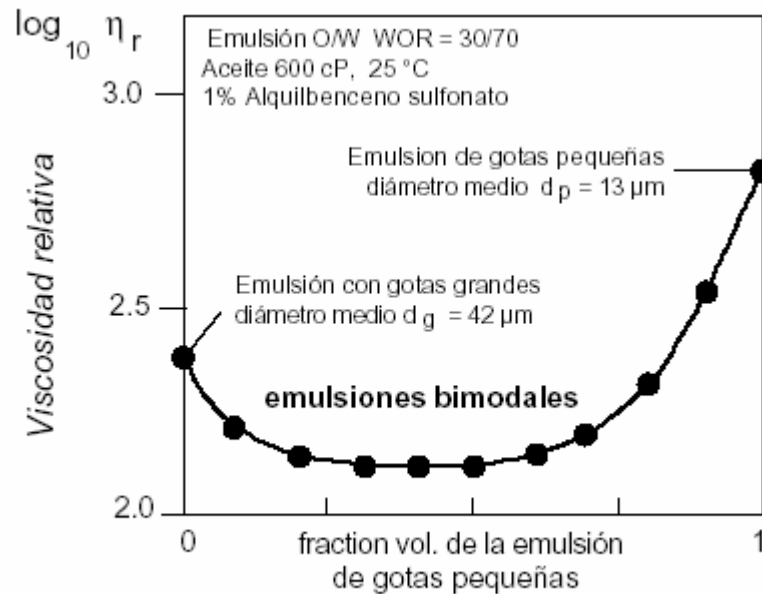


Figura N° 19. Viscosidad aparente de una emulsión obtenida al mezclar las dos emulsiones bases de diámetros medios diferentes (d_p y d_g)

II.5.3.4 Viscosidad de la Fase Interna

La viscosidad de la fase interna juega un papel solo si existe un movimiento de convección dentro de las gotas. Este movimiento es por lo general despreciable, en particular, si la viscosidad de la fase interna es mucho mayor que la viscosidad de la fase externa, como en muchos casos prácticos. Para emulsiones de aceites muy viscosos en agua, se sabe que la viscosidad de la fase interna no tiene prácticamente ninguna influencia. Sin embargo debe puntualizarse que a menor viscosidad de la fase interna en general menor el diámetro de las gotas (para una agitación dada); por lo tanto puede producirse un efecto de aumento aparente de la viscosidad de la emulsión cuando disminuye la viscosidad de la fase interna, no por la baja viscosidad de la fase interna, sino por el menor tamaño de la gota de la emulsión.

II.5.3.5 Efectos Electroviscosos

Este efecto ha sido estudiado más que todo sobre sistemas de coloides lipofóbicos. Al presentarse una doble capa eléctrica en el exterior de las gotas, el movimiento de la fase externa situada entre dos gotas puede estar retrasado por fenómenos electroviscosos.

Específicamente el drenaje de una película de fase externa entre dos gotas vecinas arrastra cargas eléctricas de la doble capa y produce un efecto llamado potencial de flujo, cuyo resultado es un flujo inverso (electro-ósmosis).

Se puede tener en cuenta este efecto de manera indirecta, suponiendo que el fluido de la doble capa está ligado con la gota, es decir suponiendo un aumento aparente del volumen de fase interna con el volumen de fase externa que solvata la capa de surfactante.

Estos efectos aumentan la viscosidad de la emulsión, de una forma a veces notable, comparable a un 50% de aumento de \emptyset .

II.5.3.6 Efecto de la Formulación

La literatura clásica no indica claramente cual es el efecto de la formulación, sino que al aumentar la concentración de emulsionante, disminuye el tamaño de gota con el resultante aumento de viscosidad.

Sin embargo estudios recientes realizados en laboratorio han mostrado que la viscosidad puede estar considerablemente afectada por la formulación.

En realidad parece que la viscosidad de la emulsión es extremadamente baja para los sistemas de tensión interfacial ultra-baja; el tamaño de gota de tales sistemas debe ser muy pequeño, pero la velocidad de coalescencia es también muy rápida.

Se conjetura que con una muy baja tensión interfacial, las gotas pueden alargarse paralelamente a las líneas de flujo y así reducir considerablemente sus interacciones. Es lo

que se observa en la movilización de aceite en un medio poroso por el proceso de drenaje micelar.¹⁴

II.6 OTROS CONCEPTOS

II.6.1 Ley de Stokes

Para número de Reynolds bajos, la fuerza de rozamiento que actúa sobre una esfera cumple con la ecuación teórica, llamada ley de Stokes, que se escribe:

$$F_D = 3\pi\mu u_o D_p \quad \text{Ec. 20}$$

donde:

F_D : Fuerza de Rozamiento (N)

μ : Viscosidad del fluido en el que se desplaza la esfera (Pa·s)

u_o : Velocidad de la esfera (m/s)

D_p : Diámetro Promedio de la esfera (m)

Si las partículas están cayendo verticalmente en un fluido viscoso debido a su propio peso puede calcularse su velocidad de caída o sedimentación igualando la fuerza de fricción con la fuerza de gravedad²⁰:

$$V_s = \frac{2}{9} \frac{r^2 g (\rho_p - \rho_f)}{\mu} \quad \text{Ec. 21}$$

donde:

V_s : Velocidad de sedimentación de la esfera (m/s)

r : Radio de la esfera (m)

ρ_p : Densidad de la esfera (Kg/m³)

ρ_f : Densidad del fluido (Kg/m³)

g : Aceleración de gravedad (m/s²)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En esta sección se presenta todo lo referente a la metodología a seguir para alcanzar los objetivos planteados en el primer capítulo, de igual forma se describen los equipos a ser utilizados.

La investigación se realizó esencialmente en dos etapas con las que se logró alcanzar el objetivo general de la misma.

En la primera etapa se formularon y prepararon emulsiones. Para la preparación de éstas se utilizó crudo Cerro Negro que es un crudo extra pesado (8,1°API), dicho crudo se diluyó con diesel para obtener distintos valores de viscosidad representativos de valores de viscosidad de crudos pesados, medianos y livianos existentes en los campos venezolanos. Las emulsiones realizadas se hicieron en un tiempo de 10 minutos, tiempo en el que normalmente es posible dispersar agua en crudo según experiencias previas variando la velocidad hasta lograr la dispersión en sí. Las emulsiones se prepararon a 50 °C y el porcentaje de agua a dispersar fue entre un 5 y 30% en masa con respecto a la cantidad de crudo.

A cada emulsión preparada se le determinó la viscosidad aparente y de igual modo se determinó la distribución del tamaño de gotas y el tamaño promedio de las mismas. Estas medidas permitieron caracterizar la emulsión que estaba siendo preparada.

La determinación de la viscosidad aparente, la distribución de tamaño de gota y el cálculo del diámetro de gota promedio son de suma importancia puesto que la formación de emulsiones va a influir en la variación de viscosidad y son precisamente el tamaño de gota promedio y la distribución de tamaño de gotas características determinantes en la variación de dicha viscosidad.

De igual modo a las emulsiones preparadas se les realizó pruebas de estabilidad estática para evaluar su estabilidad frente al almacenamiento y también a algunas de estas emulsiones se les realizaron pruebas de estabilidad dinámica, para evaluar la estabilidad de la emulsión mientras ésta recorre tramos de tuberías, pasa por válvulas, bombas, etc.

La segunda etapa del presente trabajo consistió principalmente en la revisión de las facilidades experimentales actuales y en el dimensionamiento de las facilidades necesarias para realizar pruebas con las emulsiones y analizar sus efectos en el bombeo electrosumergible.

Actualmente el laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA – Intevep está dotado de un circuito en el que se realizan pruebas con aceite mineral, para evaluar el efecto del flujo viscoso, y con agua y aire para evaluar el efecto de esta mezcla bifásica en el comportamiento de la bomba electrosumergible. Se evaluarán las facilidades existentes para su posible adecuación al nuevo circuito que manejará emulsiones. Para ello se revisaron los diagramas de flujo existentes así como se hizo un inventario de todos los equipos que componen dicho circuito.

Los resultados obtenidos de formular y preparar las emulsiones en el laboratorio, principalmente los resultados referentes a velocidad y consumo de potencia para dicha preparación, sirvieron para realizar el escalamiento del equipo que se necesitará en el laboratorio de levantamiento artificial para conseguir obtener emulsiones de similares características y ser posteriormente probadas en el nuevo circuito de bombeo electrosumergible que se diseñará. Así pues, las pruebas de laboratorio sirvieron para desarrollar el esquema de formación de emulsiones de agua en crudo en el laboratorio de levantamiento artificial

La viscosidad es una de las variables más importantes en la evaluación del desempeño de las bombas electrosumergibles. Cuando se forma una emulsión de agua en crudo, la viscosidad aumentará a medida que aumente la cantidad de agua emulsionada, de

igual modo, tanto la distribución del tamaño de gota como el tamaño de gota promedio son factores que influyen en la viscosidad de las emulsiones, por lo tanto el diseño del nuevo circuito debe contemplar el análisis de dichas características y su influencia en los mecanismos relacionados con el bombeo electrosumergible. En esta etapa se hizo la selección de los nuevos equipos que constituirían el nuevo circuito de pruebas



Figura N° 20. Esquema de la Metodología

A continuación se describe detalladamente la metodología a seguir en este trabajo especial de grado.

III.1 FORMULACIÓN DE EMULSIONES

En esta etapa de la investigación se procederá a la formulación y preparación de distintas emulsiones partiendo de fluidos con distinta viscosidad, esto con el fin de recolectar la información necesaria para el posterior escalamiento.

III.1.1 Formulación de emulsiones con diluciones de crudo Cerro Negro

III.1.1.1 Material de Prueba

El problema ocasionado por las emulsiones se debe principalmente al efecto de la viscosidad sobre el sistema de bombeo electrosumergible, por ello se trabajó partiendo de base del crudo Cerro Negro deshidratado cuyas propiedades se muestran en la Tabla N° 2:

Tabla N° 2. Propiedades del crudo Cerro Negro

Gravedad API 60/60°F (°API)	Viscosidad @ 37,8 °C (cP)
8,1	149500

Usando este crudo como base se hicieron diluciones con diesel para bajar la viscosidad de este crudo y así obtener mezclas diluidas de distintas viscosidad que permitan reproducir la gama de viscosidades presente en distintos crudos de distintas gravedades API

En el gráfico siguiente se muestra los resultados de las variaciones de viscosidad a medida que aumenta la dilución con diesel, de igual modo, en la

Tabla N° 3, se muestran los resultados obtenidos de las distintas diluciones realizadas:

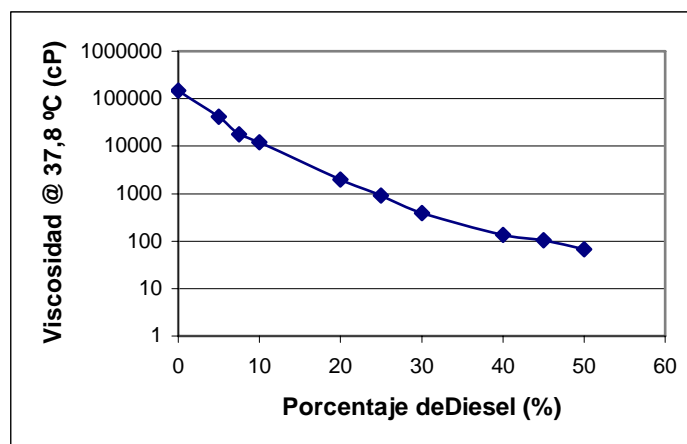


Gráfico N° 1. Viscosidad del crudo Cerro Negro en función del porcentaje de crudo usado en la dilución

Tabla N° 3. Variación de viscosidad referente a las diluciones con diesel

Porcentaje de Diesel	Viscosidad (cP) @ 37,8°C
0	149600
5	41240
7,5	17950
10	11940
20	1968
25	910
30	390
40	134,7
45	104,7
50	67,6

En la Tabla N° 3 se pueden apreciar los resultados referentes a las viscosidades obtenidas luego de efectuar las diluciones con diesel al crudo Cerro negro. Basados en los resultados obtenidos se decidió trabajar con las diluciones de 7,5%, 30% y 50%, para así poder representar viscosidades típicas de crudos pesados, medianos y livianos.

III.1.1.2 Descripción del Mezclado

El mezclado con impulsores considera el caso de mezclado en lotes en un tanque estándar. Un mezclador dinámico tiene la versatilidad de mezclar en los regímenes laminar, transitorio y turbulento en muchos casos con el mismo impulsor variando la velocidad del eje.

III.1.1.2.1 Geometría estándar

En la Figura N° 21, se presenta una geometría estándar. A continuación se resumen las consideraciones para la selección de un sistema de mezclado y un patrón de agitación que se puede reproducir a una escala mayor, siempre y cuando se satisfagan las pautas para el diseño estándar que se presentará a continuación.

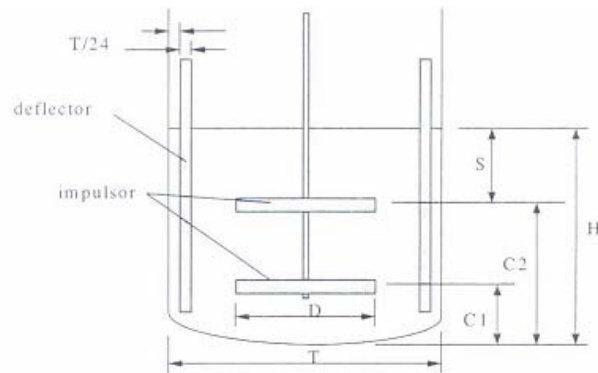


Figura N° 21. Geometría estándar para un tanque de mezclado con uno o dos impulsores

Un tanque deberá ser cilíndrico para lograr eficientemente la homogeneidad, así se requiere menor energía por unidad de volumen que si el tanque fuera rectangular. La base del tanque suele ser plana, sin embargo, se recomienda una base cóncava para minimizar la energía requerida para la homogeneización de la mezcla.

Los deflectores no son necesarios para mezclar líquidos viscosos (en régimen laminar) y, de hecho, pueden aumentar el tiempo de mezclado por la presencia de zonas muertas detrás de ellos.

La altura del fluido dentro del tanque debería ser igual al diámetro del mismo, para condiciones ideales, ya que la gran mayoría de los resultados experimentales y, por ende, las correlaciones de diseño están basados en esta condición estándar de mezclado.

III.1.1.2.2 Geometría del impulsor

En general hay tres clases de impulsores, los que generan una descarga radial, axial y mixta. En este caso específico de trabajo se trabajó con un impulsor radial (Rushton), éste tiene alas planas y, como consecuencia, un número de potencia alto (porque el arrastre es significativo). También se trabajó con un impulsor manufacturado por Tokushu Kika Kogyo Co, el impulsor aquí usado fue del tipo rotor-estator y se conoce con el nombre de T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type. Este impulsor permite un mezclado mucho más

severo que el impulsor Rushton antes mencionado y es ideal para formar emulsiones cuando la viscosidad de la fase externa no es alta o cuando el porcentaje de agua a dispersar es alto.

El torque es un parámetro importante para el costo de capital del mezclador y, por esto, es común escoger un impulsor hidrodinámico con un diámetro pequeño ($D=T/3$) para minimizar los costos, para fluidos pseudoplásticos, como es el caso de las emulsiones, un impulsor con alto torque y diámetro grande ($D=T/2$) puede ser ventajoso ya que el tiempo de mezclado se ve relativamente reducido.²¹

En la Figura N° 22, se tiene un impulsor del tipo radial, específicamente un impulsor Rushton, este tipo de impulsores poseen 6 aspas a 90°:

En todos los casos el impulsor no debería tener una geometría diferente de la especificada a continuación (en términos del diámetro del tanque T):

Diámetro del Impulsor, D	$T/3 \leq D \leq T/2$
Espacio libre desde el fondo del tanque, C	$T/8 \leq C \leq T/2$

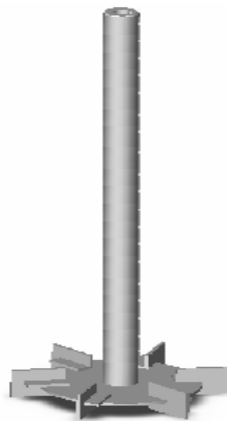


Figura N° 22. Impulsor radial Rushton

III.1.1.2.3 Equipo Utilizado

Para la formulación de emulsiones con la dilución con 7,5 % de diesel a nivel del laboratorio se siguieron los planteamientos citados con anterioridad con relación al mezclado estándar. Se utilizó un beaker de acero inoxidable como el que se muestra en la Figura N° 23.



Figura N° 23. Beaker para la formulación de emulsiones

Aquí se puede notar que el beaker tiene un diámetro T, de 9 cm, y la altura interna del mismo es de 22 cm, el beaker es metálico y también está provisto de una manta de calentamiento con una entrada y salida para el fluido de calentamiento, esta manta permite mantener la temperatura a la cual se desea formular la emulsión.

De igual modo, para la preparación de estas emulsiones, se utilizó un impulsor tipo Rushton, similar al de la Figura N° 22, el utilizado posee un diámetro D de 4 cm, por lo que se comprueba que este diámetro se ajusta a las condiciones de mezclado estándar.

Por otra parte se utilizará el equipo de mezclado que se encuentra en la Figura N° 24, este equipo puede utilizar distintos tipo de impulsores y posee una perilla para el encendido del mismo que a la vez permite controlar la velocidad del impulsor entre 0 y 5000 RPM, también al lado del mezclado se encuentra un baño de calentamiento HAAKE, que esta dotado con una manguera que permite salir al fluido de calentamiento y posee otra para la recirculación al baño del fluido de calentamiento, dichas mangueras se conectan al beaker.

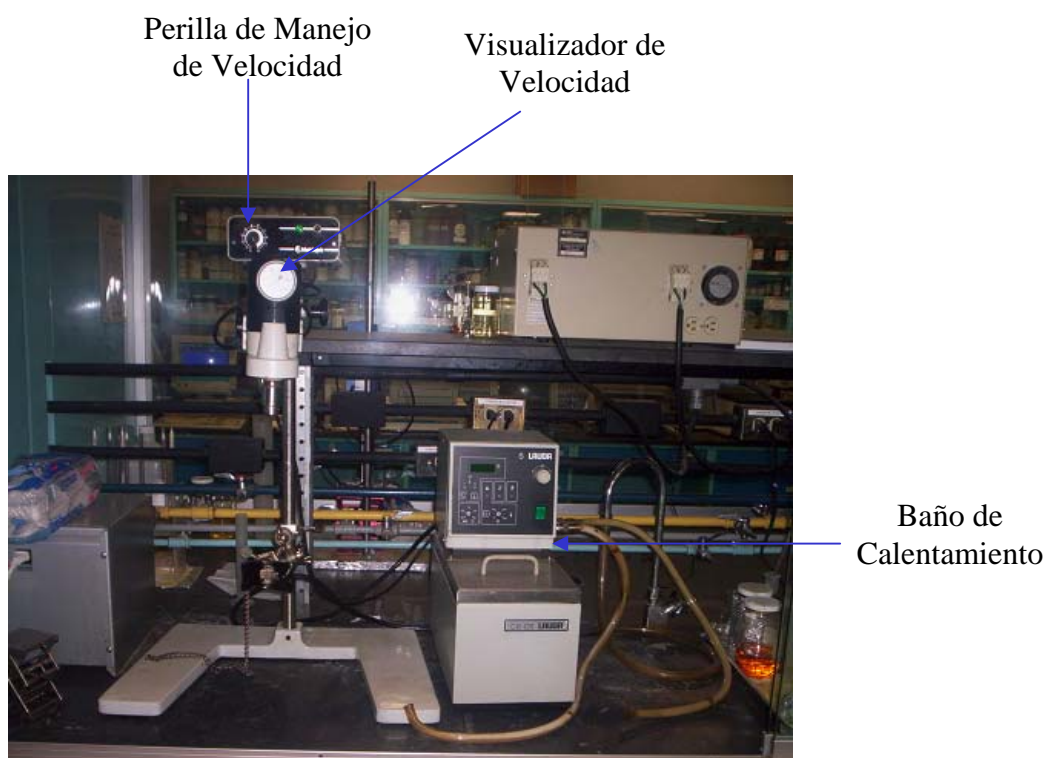


Figura N° 24. Equipo de Mezclado para la formulación de Emulsiones

Para el caso de las emulsiones que se prepararon usando como fase continua el crudo cerro negro diluido con 30% y 50 % de diesel se utilizó de igual forma un beaker parecido al de la Figura N° 23, pero con un diámetro T de 7cm y una altura interna del mismo de 17 cm.

Para estos casos se utilizó el equipo T.K Robomics *fmodel*, el cual se muestra en la Figura N° 25, con este equipo se utilizó el impulsor denominado T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type. Este equipo de mezclado permite obtener velocidades que van desde 1400 hasta 16000 RPM. De igual forma un baño de calentamiento que era conectado a la chaqueta del beaker permitía mantener la temperatura deseada para la formulación.



Figura N° 25. T.K Robomics *fmodel*

III.1.1.2.4 Procedimiento experimental

Este procedimiento será planteado en base a la formación de una emulsión de fase externa crudo Cerro Negro diluido con 7,5% de diesel y por lo tanto en el beaker de diámetro 9 cm.

En primer lugar se debe determinar cual es el volumen a formular, siguiendo los parámetros establecidos para el mezclado estándar, con la premisa de que la altura dentro del beaker debe ser igual al diámetro:

$$V = \frac{\pi \cdot T^3}{4} \quad \text{Ec. 22}$$

donde

V : Volumen a preparar (cm^3)

T : Diámetro del beaker (cm)

Sustituyendo los valores en la ecuación anterior:

$$V = \frac{\pi \cdot (9\text{cm})^3}{4} = 572,56\text{cm}^3 \quad \text{Ec. 23}$$

Dicho volumen corresponde al crudo y al agua a dispersar en él, por lo tanto, los valores correspondientes a la cantidad de crudo variarán de acuerdo a la cantidad de agua que se quiera dispersar.

Para explicar como tal el procedimiento, se planteará el caso en el que se quiere dispersar 20% de agua en el crudo.

Debido a las altas viscosidades que puede tener el crudo Cerro Negro a temperatura ambiente aún diluido y la dificultad de hacer mediciones precisas de volumen con este crudo, se trabajará en peso en lugar de volumen, el crudo Cerro Negro, tiene una densidad de 1,1 gr/ml a 30°C, por lo que se tratará como si su densidad fuera 1 gr/ml, el agua tiene una densidad de 1 gr/ml, por lo tanto se asumirá que la masa de emulsión a preparar es de 572,56 gr. La masa de crudo será la siguiente:

$$M_c = 572,56\text{gr} \cdot \frac{(100 - \% A)}{100} = 572,56 \cdot \frac{(100 - 20)}{100} = 458,04\text{gr} \quad \text{Ec. 24}$$

donde:

Mc: Masa de crudo (gr)

%A: Porcentaje de agua a dispersar (%)

La masa de agua será:

$$Ma = 527 \text{ gr} \cdot \frac{\% A}{100} = 527,56 \cdot \frac{20}{100} = 114,51 \text{ gr} \quad \text{Ec. 25}$$

donde

Ma: Masa de agua a dispersar (gr)

Este valor, de 458,04 gr. corresponde a la cantidad de crudo. Dicha cantidad de crudo se pesa dentro del beaker en una balanza hasta completar el valor antes señalado. Luego el beaker es colocado en un baño de agua que se encuentra a la temperatura a la que se va a formular por un tiempo aproximado de una hora. De igual modo se pesa la masa correspondiente de agua

Pasado el tiempo de calentamiento, el beaker se saca del baño de calentamiento y se lleva al equipo de mezclado, se conectan las mangueras del baño de calentamiento anexas al equipo de mezclado, a la entrada y salida de la manta de calentamiento del beaker con el fin de mantener la temperatura de formulación.

Se baja el impulsor, y se posiciona a 2 cm del fondo del beaker. Luego se agrega el agua y se acciona la perilla de velocidad del equipo de mezclado hasta visualizar la velocidad deseada en el visualizador de velocidad.

La escogencia de la velocidad se basó en determinar cual era la mínima velocidad para dispersar cierta proporción de agua en determinada fase continua, para ello se escogía una velocidad y se observaba si con esa velocidad era posible dispersar esa cantidad de agua, de no ser así se aumentaba la velocidad. Una vez que se conseguía dispersar esa

cantidad de agua se procedía a preparar otra emulsión aumentando la proporción de agua y la velocidad con la que se comenzaba a ensayar era la obtenida en la emulsión precedente.

III.1.1.2.5 Temperaturas de formulación

Basados en información referente a temperaturas comunes a fondo de pozo, que oscilan entre 100 y 200 °F (37,8 y 93 °C), se decidió trabajar con una única temperatura de 50 °C, ya que esta cae en el rango antes mencionado y es representativa de muchos pozos existente en el país.

III.1.1.2.6 Cantidad de Agua

La producción de crudo esta asociada con la producción de agua, en campo esta agua se dispersa en el crudo formando emulsiones, este porcentaje de agua varía en un amplio rango, por lo tanto se trabajará dispersando desde 5 hasta 30% en masa de agua, ya que en estas proporciones se suele encontrar habitualmente las emulsiones de agua en crudo que se forman en campo.

III.1.1.3 Determinación de Viscosidad de Emulsiones

III.1.1.3.1 Descripción del Equipo

III.1.1.3.1.1 Cabezal del Viscosímetro

El equipo utilizado fue el Viscometer HAAKE RV30 el cual se muestra en la Figura N° 26, el equipo está dotado del cabezal de medición M. Este cabezal comprende el motor, tacogenerador, resorte, transductor del par y amplificador. Está conectado a la unidad central RV30 mediante un cable multipolar.

El ángulo de torsión del resorte de medición es directamente proporcional al par de torsión y se transforma en una señal eléctrica en el transductor del par. El par de torsión máximo provoca en el resorte un ángulo de torsión de aproximadamente $0,5^\circ$ ó $8,7 \cdot 10^{-3}$ rad. El sistema no presenta rozamiento ni amortiguación por lo que se obtiene una respuesta instantánea. Esto puede provocar ligeras fluctuaciones de la señal durante la medición,

originadas por una mezcla no homogénea, burbujas de aire, partículas en la sustancia o por un rotor dañado.

III.1.1.3.1.2 Recipiente de Atemperación

El equipo también está provisto de un recipiente de atemperación el cual tiene la misión de atemperar la muestra (entre -30 y 100 °C) y además centrar el vaso de medición. El recipiente de atemperación posee dos conexiones a las que puede conectarse un termostato de circulación.

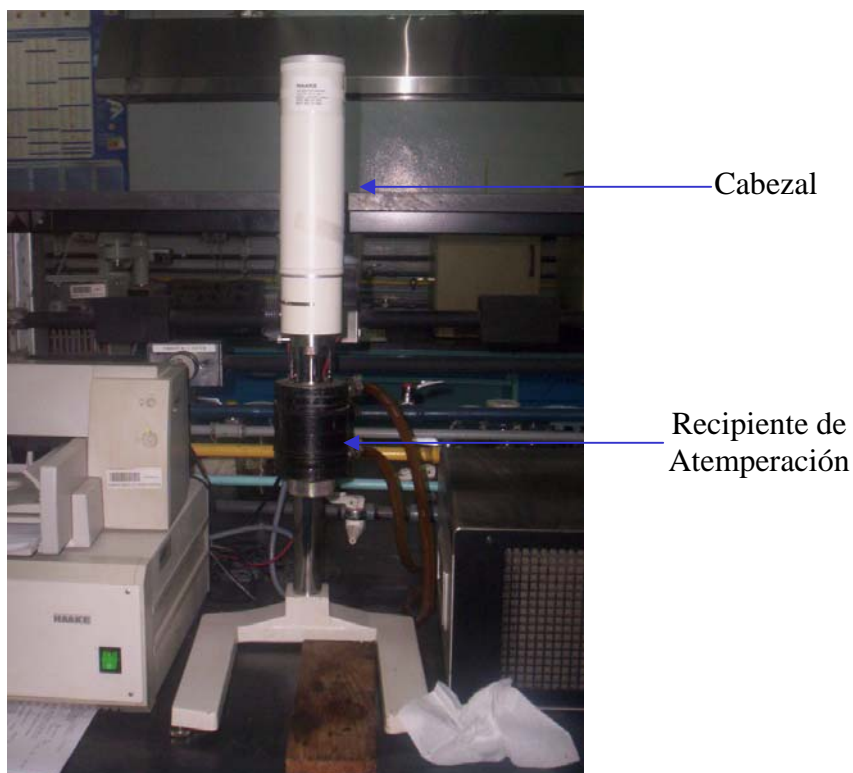


Figura N° 26. Viscosímetro HAAKE CV30

III.1.1.3.1.3 Sistemas sensores

III.1.1.3.1.3.1 Sistema sensor MV

El MV es usado principalmente para mediciones de líquidos de mediana viscosidad, como aceites pesados, pinturas, barnices, resinas, emulsiones, etc., trabajando en un rango de tasa de corte medio.

Este sistema de sensor del cilindro coaxial consiste en un vaso MV que se usa con tres rotores distintos (MV1, MV2 y MV3) que proveen diferentes rangos de medición de viscosidad. Es importante destacar que solo se trabajó con el rotor MV1. En la Figura N° 27, se muestra el sistema sensor MV.



Figura N° 27. Sistema Sensor MV

A continuación en la Tabla N° 4, se presenta la información referente al sistema sensor MV asociado específicamente a las características del rotor MV1:

Tabla N° 4. Características del sistema sensor MV

Sistema Sensor	MV1
Cilindro Interno (Rotor)	
Radio Ri (mm)	20,04
Altura L (mm)	60
Cilindro Externo (Vaso)	
Radio Ra (mm)	21
Relación de Radios Ra/Ri	1,05
Gap (mm)	0,96
Volumen de la Muestra V (cm ³)	34
Temperatura (°C)	-30/100
Factores del Cabezal M	
a (Pa/%τ)	3,22
m (s ⁻¹ /D)	11,7

A continuación en el Gráfico N° 2, se muestra el rango de medición del sistema MV:

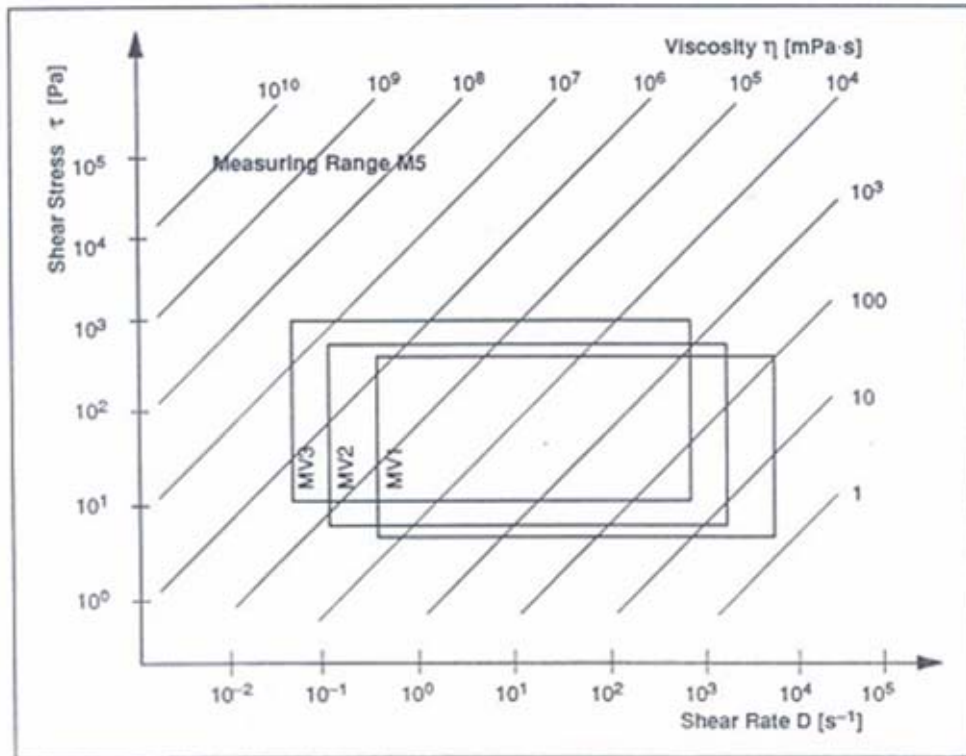


Gráfico N° 2. Rango de medida del sistema sensor MV

III.1.1.3.1.3.2 Sistema Sensor SV

El SV es usado para mediciones de líquido de altas viscosidades y pastas tales como grasas, cremas y plastisoles. Trabajando en un rango de tasa de corte de bajo a medio.

Este sistema de sensor del cilindro coaxial consiste en un vaso SV que se usa con tres rotores distintos (SV1 y SV2) que proveen diferentes rangos de medición de viscosidad. En la Figura N° 28 se muestra el sistema sensor SV:



Figura N° 28. Sistema Sensor SV

A continuación en la Tabla N° 5, se presenta la información referente al sistema sensor SV:

Tabla N° 5. Características del sistema sensor SV

Sistema Sensor	SV1	SV2
Cilindro Interno (Rotor)		
Radio Ri (mm)	10,1	10,1
Altura L (mm)	61,4	19,6
Cilindro Externo (Vaso)		
Radio Ra (mm)	11,55	11,55
Relación de Radios Ra/Ri	1,14	1,14
Gap (mm)	1,45	1,45
Volumen de la Muestra V (cm ³)	9	6
Temperatura (°C)	-30/100	-30/100
Factores del Cabezal M		
a (Pa/%τ)	12,4	37,6
M (s ⁻¹ /D)	4,45	4,45

A continuación en el Gráfico N° 3 se muestra el rango de medición del sistema SV:

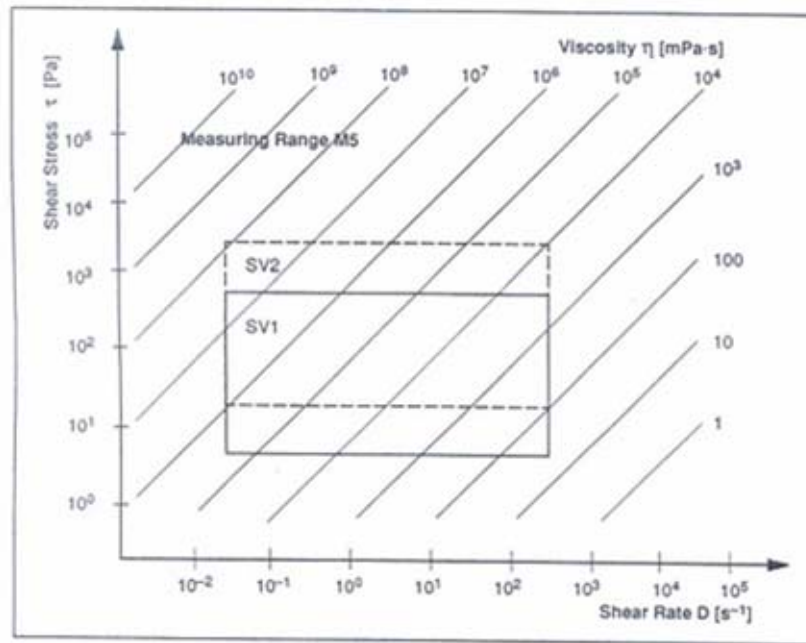


Gráfico N° 3. Rango de medición del sistema sensor SV

III.1.1.3.1.4 Software

El viscosímetro HAAKE RV30 está dotado con un software que permite seleccionar el sistema sensor a ser utilizado y que permite registrar los resultados de las mediciones hechas. Dicho software permite seleccionar el rango de tasa de corte que va a proporcionar el equipo para realizar la respectiva medición del esfuerzo de corte y con ambos parámetros obtener el valor de la viscosidad.

El software está programado de tal manera que la medición se hace en dos segmentos. En el primer segmento se trabaja con valores de tasa de corte que van desde 0 a 10 s^{-1} y se registran 40 puntos en dicho segmento. El segundo segmento trabaja con valores de tasa de corte que van desde 10 a 120 s^{-1} e igualmente se registran 40 puntos.

Estos segmentos son los utilizados como un estándar, pero pueden ser variados de acuerdo al caso. En el caso de medir fluidos newtonianos en los que la viscosidad es independiente del cizallamiento se utiliza solo un segmento y se puede bajar el valor máximo de tasa de corte.

El esfuerzo de corte que es posible medir con cada rotor correspondiente a cada sistema sensor es distinto, por lo tanto es importante ajustar el software de acuerdo al rotor que se va a utilizar.²²

III.1.1.3.2 Procedimiento experimental

La emulsión que se encontraba en un recipiente se calentó en un baño por un periodo de aproximadamente una hora para luego ser trasladado a los vasos de los sistemas sensores, al emplear el sistema sensor MV, se llenó el vaso hasta la marca inferior del mismo, que equivale a un volumen aproximado de 34 ml, al usar el sistema SV con el rotor SV1, se llena el vaso hasta la marca inferior que corresponde a un volumen aproximado de 9 ml, al usar el rotor SV2 se utiliza un espaciador sólido, y se llena el vaso hasta la segunda marca que equivale a un volumen aproximado de 6 ml.

Se colocaba el rotor en el cabezal ajustándolo al tornillo que se encuentra la final de dicho cabezal; luego se introducía el vaso ajustándolo en la parte inferior con un tornillo, para este momento el rotor se encontraba sumergido en la emulsión a la que se le iba a medir la viscosidad.

En la Figura N° 29, se muestra esquemáticamente los sistemas sensores MV y SV con las muestras en los correspondientes vasos.

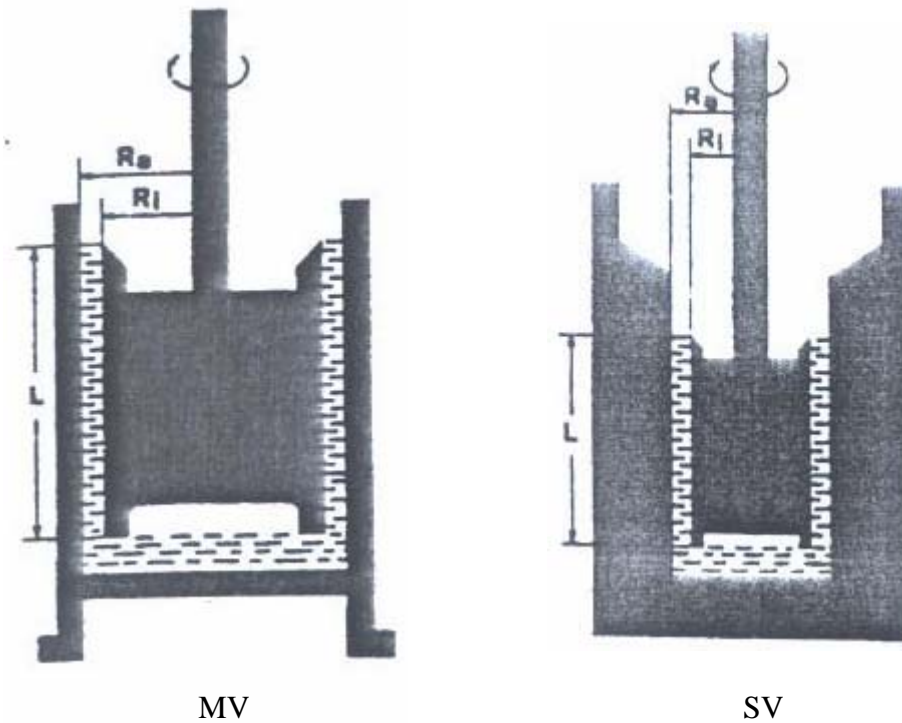


Figura N° 29. Representación esquemática de los sistemas sensores MV y SV

Se dejaba el sistema montado unos 15 minutos para asegurar que la temperatura de la muestra fuera la proporcionada gracias al efecto del recipiente de atemperación; luego de esto se accionaban los comandos necesarios y comenzaba la medición de la viscosidad.

Una vez terminada la experiencia se almacenaban los datos electrónicamente y se imprimían, a continuación se muestra en la Figura N° 30, la hoja de resultados obtenidos al realizar la medida de la viscosidad de un crudo:



Figura N° 30. Hoja de resultados de medición de viscosidad

III.1.1.4 Tamaño de gota promedio y distribución de tamaño de gota

III.1.1.4.1 Descripción del Equipo

Para la realización de este procedimiento se hizo uso del microscopio ZEISS Axioplan 2, en la Figura N° 31, se puede apreciar dicho equipo.

El equipo está provisto de los típicos binoculares con sus respectivas perillas de ajuste para la conseguir una mejor visualización, igualmente el microscopio está provisto de una cámara JVC la cual se encuentra conectada a una computadora que permite visualizar las imágenes en la pantalla de la computadora y que permite capturar dichas imágenes con el software que esta asociado a este equipo.

De igual modo el equipo está dotado de una plancha giratoria que permite visualizar la muestra de distintos ángulos sin necesidad de mover ésta directamente. También el equipo está dotado de varios lentes objetivos (2,5x, 5x, 10x, 20x, 40x) que son los que se encargan de magnificar las imágenes, adicionalmente el equipo posee una lente que permite magnificar la imagen vista 2,5 veces.

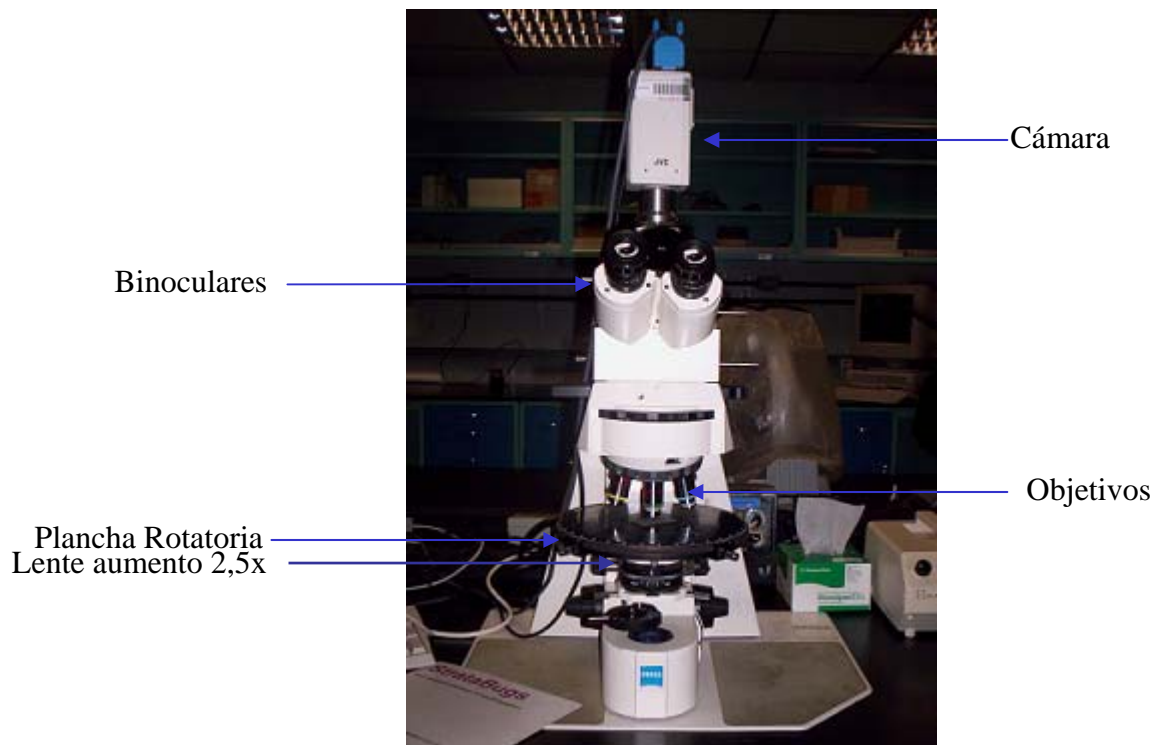


Figura N° 31. Microscopio ZEISS Axioplan 2

III.1.1.4.2 Análisis de Imágenes

El análisis de las imágenes tomadas en el microscopio fue hecho por personal de PDVSA – Intevep, mediante el uso del programa Image Pro-Plus Versión 5.0, tal programa permite determinar el tamaño de gota promedio por número y por área, así como de igual forma realiza provee al programa Microsoft[®] Excel los datos necesarios para realizar la distribución estadística de los distintos diámetros de gota.

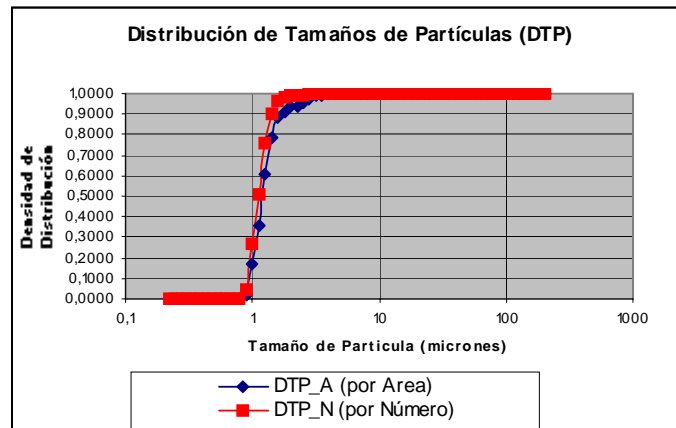


Gráfico N° 4. Ejemplo de gráfico de distribución acumulada de tamaño de gota

El Gráfico N° 4, muestra el gráfico de distribución acumulada de los tamaños promedio de gota, el color rojo da la distribución por número, mientras que el color azul da a distribución por área.

La Figura N° 32, muestra una de las pantallas en la que se muestran resultados del cálculo promedio de diámetro de gota, ésta es de por sí, uno de los resultados arrojados por el software antes mencionado:

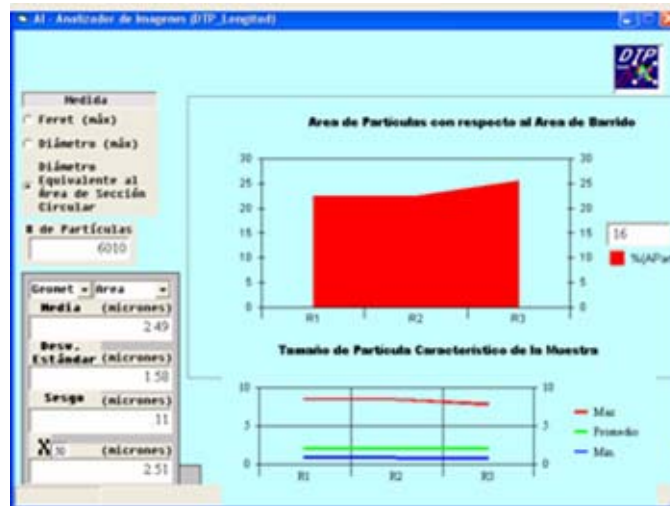


Figura N° 32. Pantalla de Resultados Image Pro-Plus Versión 5.0

III.1.1.4.3 Procedimiento Experimental

Con una varilla metálica se tomaba una gota de la emulsión, ésta se esparcía sobre un porta – objetos, es importante destacar que dicha gota debía ser esparcida de tal manera que quede lo más traslúcida posible. Luego la muestra es cubierta con un cubre – objetos.

Se colocaba el porta–objetos en la plancha giratoria del Microscopio ZEISS Axioplan 2, y se seleccionaba el objetivo de menor alcance, es decir, el de 2,5x. Se manipulaba la perilla de alejamiento y acercamiento del microscopio hasta lograr un enfoque correcto. Luego se seleccionaba el objetivo de 20x y nuevamente se manipula la perilla hasta lograr un enfoque nítido.

Una vez logrado este enfoque se procedía a tomar la foto mediante el uso de la cámara JVC que se encuentra adaptada al microscopio y que está asociada a un software en la computadora. Se rotaba la plancha giratoria para tomar una segunda foto de la misma muestra, pero desde otro ángulo y opcionalmente se toma una tercera y última foto.

Si era necesario y si con ello se conseguía un mejor enfoque, se podía usar el lente adicional que permite un aumento de 2,5x sobre lo que ya se tiene con la selección del lente objetivo.

En la Figura N° 33, se tiene una foto tomada a una emulsión de agua en crudo Cerro Negro, el porcentaje de agua es de 20%:

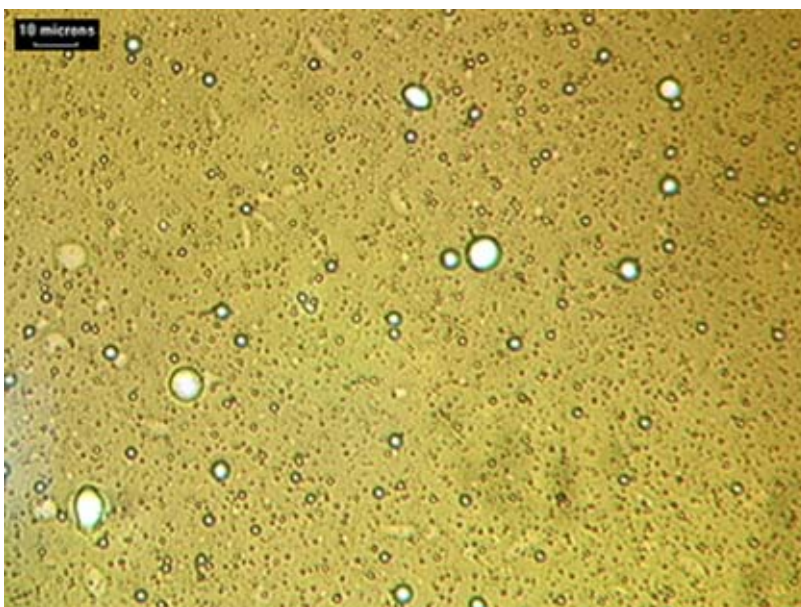


Figura N° 33. Ejemplo de foto tomada con el microscopio ZEISS Axioplan 2

Una vez tomada las fotos, fueron analizadas por especialistas de PDVSA – Intevp, y luego los resultados correspondientes a la distribución de tamaño de gota y al promedio de diámetro de gota fueron entregados.

III.1.1.5 Presentación de Resultados

La formulación y preparación de estas emulsiones permitió obtener los datos de velocidad y tipo de impulsor con que se formó cada una de ellas e igualmente las características de viscosidad y diámetro promedio de gota de cada emulsión preparada. Estos datos fueron esenciales para realizar el posterior escalamiento a un equipo de mayores dimensiones. Para cada una de las diluciones hechas del crudo cerro negro con diesel que representarán valores de viscosidades de crudos venezolanos se obtuvo una tabla como la que se presenta a continuación:

Tabla N° 6. Tabla ejemplo, resultado de preparación de Emulsiones

Porcentaje de Agua dispersado (%)	Tipo de Impulsor	Viscosidad de la fase Externa @ 50 °C (cP)	Velocidad del Impulsor (RPM)	Diámetro Promedio de Gota (μm)
5				
10				
20				
30				

III.1.2 Cinética de Formación de emulsiones

El fin principal de estas pruebas fue observar la variación del diámetro promedio de gota con respecto al tiempo mientras la emulsión esta sometido a la acción del impulsor, en el tiempo determinado para la formación de tales emulsiones.

III.1.2.1 Procedimiento experimental

Se siguen los mismos pasos expuestos en el apartado III.1.1.2.4 para la preparación de la emulsión, es importante destacar que se debe fijar el parámetro de temperatura. Se selecciona una velocidad para la formulación y se comienza el mezclado por un periodo de 10 minutos. Para cada minuto se toma una muestra la cual se le determina el diámetro de gota siguiendo el procedimiento expuesto en el apartado III.1.1.4.3. Se grafica entonces el diámetro de gota en función del tiempo, y se debería obtener un gráfico parecido al siguiente:

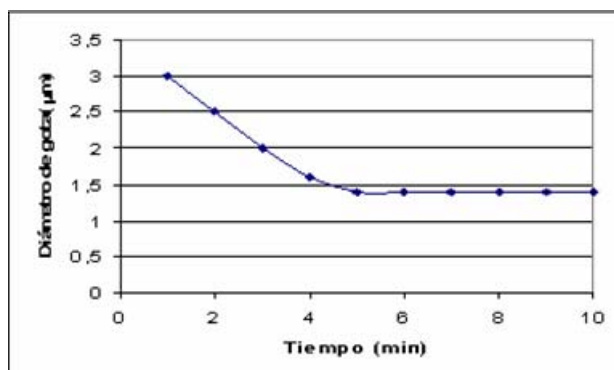


Gráfico N° 5. Modelo de gráfico esperado en prueba de cinética de formación de emulsiones

III.1.3 Estabilidad estática de emulsiones

Esta prueba se realizó con el fin de evaluar la estabilidad de la emulsión cuando se expone a condiciones de almacenamiento, evaluar estabilidad en términos de emulsiones, significa evaluar la capacidad de que la fase dispersa, en este caso el agua, de no coalescer. El tiempo de evaluación fue de 7 días, ya que no se espera mayor tiempo de almacenamiento. Las pruebas que se realizan actualmente en el laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA – Intevep en el circuito actual de bombeo electrosumergible suelen hacerse en una semana laboral, es decir, en cinco días, por lo que se estiman 7 días como un tiempo suficiente para la realización de estas pruebas de estabilidad.

III.1.3.1 Procedimiento experimental

Se formulaba y preparaba la emulsión en lo que sería el día cero, luego se procedía a hacer la medición de la viscosidad de la emulsión según el procedimiento citado en el apartado III.1.1.3.2 y también se determinaba el diámetro promedio de gota siguiendo el procedimiento descrito en el apartado III.1.1.4.3. Estas mismas mediciones se realizaron igualmente el día 2, el día 4 y finalmente el día 7. La emulsión era almacenada en una estufa a 50°C.

Se graficaba entonces la variación del diámetro promedio de gota y la variación de viscosidad con respecto al tiempo. Del análisis de estos gráficos se estableció la estabilidad de las emulsiones frente a las condiciones de almacenamiento y se estableció el tiempo máximo de almacenamiento de dichas emulsiones.

III.1.4 Estabilidad Dinámica de emulsiones

No hay una medida directa de la estabilidad dinámica de emulsiones. Para el caso específico de Orimulsión[®], existía la necesidad de desarrollar un método para determinar la calidad del producto basada en la estabilidad dinámica. La respuesta de PDVSA – Intevep

es el reómetro de coalescencia, el cual es un dispositivo capaz de medir la calidad de emulsiones en general.

III.1.4.1 Descripción del equipo

El dispositivo consta de una celda, provista de un arreglo rotor–estator de excentricidad y velocidad variable. La muestra de emulsión es llevada a la celda desde una bombona presurizada, con lo cual se puede controlar el campo de flujo y el tiempo nominal de residencia. Al variar la excentricidad y la velocidad rotacional, también varían los patrones de flujo. Con ello se pueden representar los parámetros responsables de generar estabilidad dinámica en una emulsión, tales como la tasa de corte, los gradientes en distribución de presión, expansiones y contracciones abruptas y el flujo rotacional. En la Figura N° 34, se presenta un diagrama esquemático del reómetro de coalescencia en el que se pueden apreciar las principales piezas que componen al equipo, al igual que la trayectoria seguida por la muestra durante un paso por el aparato.

III.1.4.2 Mecanismos representados en el reómetro

En la Tabla N° 7, se resumen los mecanismos hidrodinámicos responsables del deterioro en la calidad de emulsiones durante su manejo. Posteriormente se explica como se pueden representar estos mecanismos con el reómetro de coalescencia y como se interpretan los resultados de una prueba a nivel de laboratorio, para entender el comportamiento a mayor escala.

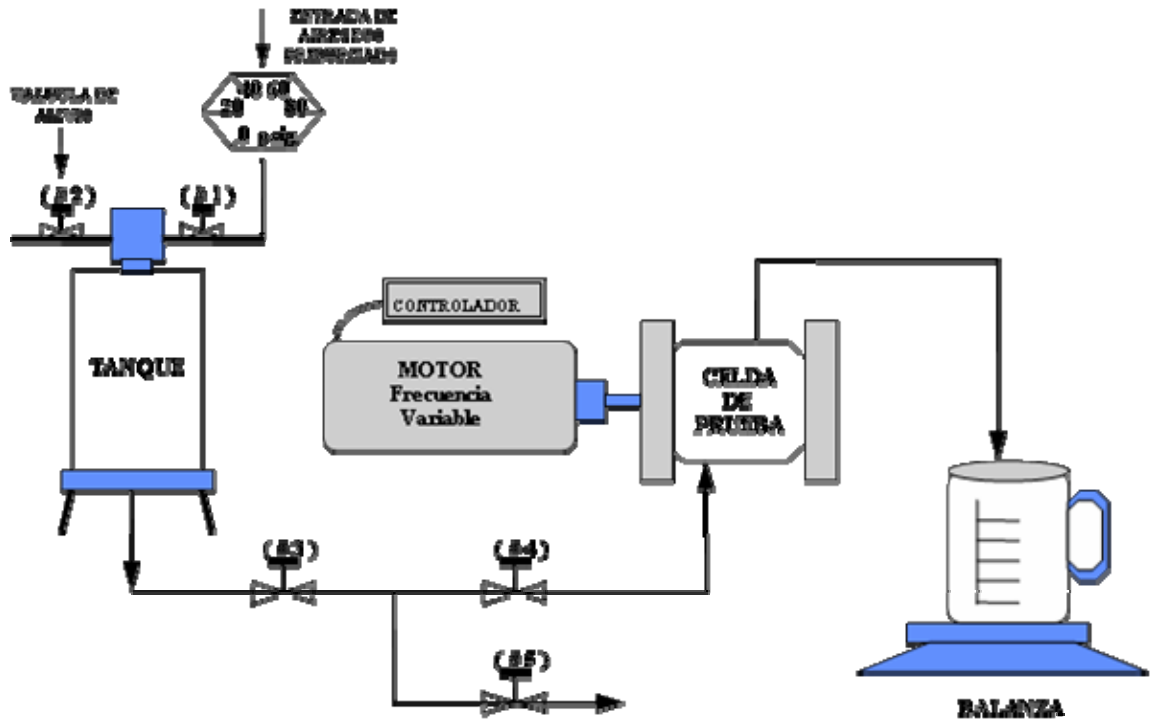


Figura N° 34. Diagrama esquemático del réómetro de coalescencia.

Tabla N° 7. Mecanismos responsables del deterioro de emulsiones y su impacto

Mecanismo	Impacto
Tasa de Corte: -Rotacional - Extensional	Deformación de gotas. Posible coalescencia o rompimiento.
Contracciones y expansiones abruptas.	“Molienda” o atricción de las gotas. Rompimiento por fuerzas de contacto mecánica. Coalescencia por inversión de fase local.
Cambios en gradientes de presión.	Aumento en el empaquetamiento local. Coalescencia e/o inversión local. Posible deformación de las gotas. Posible cavitación local.

Los mecanismos arriba mencionados juegan un papel cuya importancia puede variar, dependiendo del equipo donde se maneja la emulsión. Por ejemplo, en una válvula estrangulada hay fuertes cambios en los gradientes de presión, producidos por una

contracción y expansión abrupta. Sin embargo, en bombas de tornillo estos mecanismos son despreciables, pero la tasa de corte puede ser extremadamente alta en las holguras entre el tornillo y la cubierta (necesariamente pequeñas para alta eficiencia de bombeo). Las bombas centrífugas tienen todos los mecanismos mencionados anteriormente y además, pudieren tener una alta recirculación del fluido, que es responsable de un tiempo de residencia alto dentro de la bomba y, por lo tanto, la probabilidad de daño por cualquier mecanismo es proporcionalmente más alta en comparación con una bomba de tornillo (con diseño de poca recirculación).

Es evidente que la complejidad del campo de flujo en la cadena de manejo es tal que no hay un sólo dispositivo capaz de representar todo de una vez. Sin embargo, el reómetro es capaz de representar unos mecanismos, aislados o en conjunto con otros mecanismos. La variabilidad de la excentricidad y la velocidad rotacional del reómetro permiten el control de la severidad de las condiciones de flujo a representar: corte, distribución de gradientes de presión, contracción y expansión, y flujo rotacional. También la variación de la presión a través del reómetro permite controlar el tiempo nominal de residencia y, por lo tanto, la probabilidad de experimentar daño bajo un campo de flujo dado.

En resumen, esa flexibilidad permite establecer las condiciones bajo las cuales la estabilidad dinámica de una emulsión es mantenida durante su manejo por bombas y tuberías. El reómetro de coalescencia es el primer dispositivo conocido capaz de medir la estabilidad dinámica a través de un campo de flujo representativo, conocido y controlable. Así se permite un impacto positivo sobre la comercialización de emulsiones en general.²³

III.1.4.3 Procedimiento experimental

Se tomó una muestra de un galón de emulsión. Primeramente se tomaron solo 1800 g y se llevaron a la temperatura deseada. Se vertió esta muestra en el tanque y se reguló la presión a 40 psig, luego con el motor apagado se tomó el tiempo en que tardó en fluir una muestra de 1350 g. Se calculó el tiempo nominal, si éste era menor a 2,5 s se reducía la presión a 35 psig y si era mayor a 3,3 s se aumentaba a 45 psig. Se tomó una muestra para

determinar su diámetro promedio de gota según el apartado III.1.1.4.3 de este capítulo. Esto constituye el pase 0.

La muestra se regresó al tanque y el equipo se reguló a la presión ya determinada y se colocó el motor a 6500 rpm, se encendió el controlador y cuando marcó 3000 rpm se abrió la válvula correspondiente para permitir la salida de la muestra, al haber salido unos 1350 g se registró el tiempo, se analiza el diámetro promedio de gota. Se repite esto mismo hasta completar 7 pases.

El cambio en el diámetro promedio de gota indicara coalescencia, que será sinónimo de pérdida de estabilidad.

El procedimiento detallado de esta prueba se encuentra descrito en el Anexo N° 2

III.2 REVISIÓN DE FACILIDADES EXISTENTES EN EL LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE PDVSA-Intevep

III.2.1 Revisión de diagramas de flujos

Actualmente en el laboratorio de levantamiento artificial existe un circuito experimental, en el cual se está evaluando el comportamiento del bombeo electrosumergible con flujo multifásico y viscoso. Existen diagramas de flujo de proceso (DFP y DTI) que describen tal circuito, tales diagramas fueron evaluados para entender el funcionamiento del circuito actual y así se evaluó la posible adecuación del mismo para el circuito de prueba con emulsiones. Se hizo una descripción del proceso que actualmente se lleva a cabo en las instalaciones de dicho laboratorio.

III.2.2 Elaboración de lista de equipos

Basado en los equipos existentes en el actual circuito de pruebas, se elaboraron varias listas en las que se enumeren éstos: bombas, intercambiadores de calor, separadores; tales listas contemplan información referente al fabricante, dimensiones y otras características de cada equipo en sí.

III.3 DISEÑO DE NUEVAS FACILIDADES EXPERIMENTALES EN LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL DE PDVSA-Intevep.

El diseño de nuevas facilidades se hizo de manera conceptual, para ello se desarrolló un diagrama de flujo de proceso, una descripción del proceso y de igual manera un listado en el que se especifican los equipos y las tuberías. Este diseño básico se realizó siguiendo lo establecido en la literatura para tal fin.

III.3.1 Elaboración de Diagrama de flujo de Proceso

El Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) es una representación esquemática del proceso, sus condiciones de operación normal y su control básico. Este también indica los efluentes (líquidos, gases o sólidos) emanados del proceso y su disposición. El diagrama incluye el balance de masa e información para el diseño y especificación de equipos, además sirve de guía para desarrollar el Diagrama de Tuberías e Instrumentación.

III.3.1.1 Información de flujos másicos y volumétricos

a) Las características de las corrientes de alimentación, intermedias, reciclos y productos acabados se resumen en una tabla ubicada en la zona inferior del plano.

b) La tabla contiene parte de los datos de proceso generados

- Número de la corriente
- Descripción de la corriente (ej. crudo de alimentación)
- Flujo másico y/o flujo volumétrico (rangos)
- Temperatura de operación
- Presión de operación
- Densidad o gravedad específica
- Viscosidad absoluta
- Estado físico.

III.3.1.2 Equipos de proceso

a) Cada equipo debe tener los siguientes datos: código de identificación, nombre del equipo y características de operación normal. A continuación se muestra la información a reportar de algunos equipos básicos:

Tabla N° 8. Información reportada en DFP's de algunos equipos

Equipo	Información a reportar
Tambor	1. Código de identificación (separador / acumulador) 2. Nombre 4. Diámetro interno 5. Longitud entre tangentes (T/T)
Intercambiador de calor,	1. Código de identificación 2. Nombre 3. Calor intercambiado a condiciones de operación 4. Tipo
Bomba	1. Código de identificación 2. Nombre 3. Flujo volumétrico a condiciones de operación normal 4. Diferencial de presión

b) De igual forma, la elaboración del DFP contemplará los accesorios necesarios para hacer los muestreos que complementarán y que serán parte del circuito experimental de pruebas.

III.3.1.3 Líneas de proceso

a) Cada línea de proceso desde y hacia los equipos se identifica con un número dentro de un rombo para referirlo a los balances de masa y energía.

b) La identificación de las corrientes de proceso en los DFP debe realizarse siguiendo los criterios siguientes:

_ Numerar las corrientes principales y los ramales.

- _ Numerar una sola de las corrientes paralelas o trenes idénticos.

 - _ Asignar los números a las corrientes de proceso en orden creciente de acuerdo al recorrido del flujo principal a través de la unidad de proceso.

 - _ Cambiar la numeración de la corriente cuando hay cambios de condiciones: presión, temperatura o flujo, en la misma.

 - _ Identificar como número uno (1) la corriente de alimentación principal, continuando la secuencia numérica a lo largo de la unidad de proceso y finalizar con los productos, aún cuando exista más de un (1) plano y continuar numerando los ramales en forma similar.

 - _ Identificar cada una de las corrientes de proceso inmediatas a cada uno de los equipos; a manera de facilitar la especificación de los mismos.
- c) En los DFP no se debe mostrar el diámetro, numeración y material de las líneas.

III.3.1.4 Control del proceso

Es importante señalar que por ser un circuito de prueba se tendrá control sobre ciertas variables de proceso que no se constituirían como lazos cerrados de control. De igual modo se realizarán las estrategias de control adecuadas y necesarias para aquellos variables que sí lo requieran.

- a) El DFP muestra el esquema de control considerado para una operación segura y eficiente de la planta. De acuerdo a esto se debe indicar en forma simplificada los lazos de control requeridos, y si el alcance de trabajo así lo requiere, la ubicación de las principales válvulas de alivio.

b) El esquema de control del proceso no pretende reflejar la instrumentación final de la planta, por lo tanto, no deberá indicar el tipo de transmisión de señal (neumática o electrónica), ni la ubicación de control será en campo, panel o si forma parte de un sistema computarizado.

III.3.2 Escalamiento

Una vez conocida la velocidad con la que se preparó cada una de las emulsiones y teniendo en cuenta información referente al tipo de impulsor empleado y a la temperatura de formación se procedió al escalamiento para dimensionar el equipo que va a ser utilizado a futuro en el laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA-Intevep.

III.3.2.1 Escogencia del Impulsor

Las experiencias realizadas en el laboratorio de fisicoquímica de producción permitieron realizar las emulsiones utilizando dos tipos de impulsores: un impulsor Rushton de 6 aspas y un impulsor denominado T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type. El escalamiento se hizo en base a la escogencia del segundo impulsor, debido a que con él se realizaron la mayoría de las emulsiones y debido a que sólo con éste se pueden alcanzar altos valores de potencia específica que no podrían ser reproducibles por el primer impulsor y que son necesarios para poder formar las emulsiones cuya viscosidad de la fase externa sea menor y cuya proporción de fase interna es elevada.

III.3.2.2 Principios de Similitud

Siempre ha sido de rigor el considerar el principio de similitud cuando se introduce un escalamiento. Los principios de similitud generalmente reconocidos como aplicables para la agitación son el geométrico, cinemático y dinámico.

La similitud geométrica requiere que el equipo escalado y el original sean de la misma forma, y que todas las dimensiones lineales se relacionen entre sí por medio de un factor de escala constante. La similitud geométrica se mantiene frecuentemente cuando se

va de pruebas de banco a plantas piloto. La similitud geométrica se ilustra en la Figura N° 35. Para este caso en específico, se conservó a cabalidad este principio de similitud.

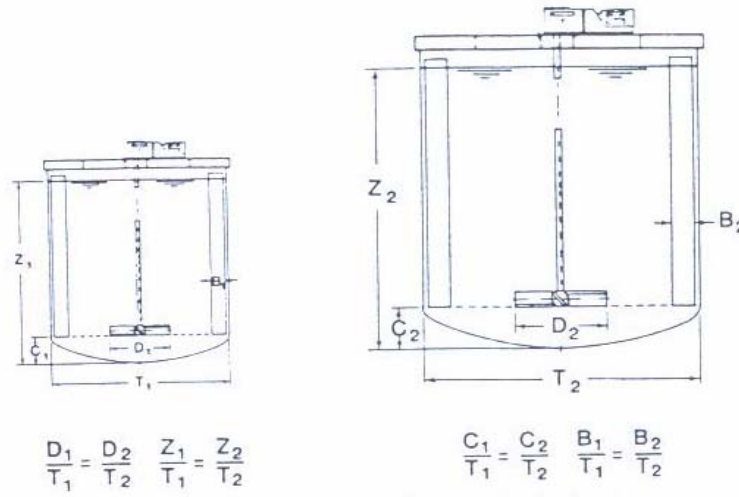


Figura N° 35. Ejemplo de similitud geométrica

La similitud cinemática tiene que ver con los flujos del equipo escalado y del equipo original. Dos flujos son cinemáticamente similares cuando las velocidades en puntos correspondientes están en la misma dirección y se relacionan en magnitud mediante un factor de escala constante. El mantenimiento de la similitud cinemática no aplica debido a que el incremento de las velocidades del líquido con el escalamiento resultaría en un incremento en la intensidad de la potencia que sería excesivo. Por ello se busco trabajar a una velocidad máxima (3000 RPM) que pudiera ser alcanzada por un motor de manufactura comercial.

La similitud dinámica se basa en que tanto el flujo del equipo original como el del equipo escalado deben tener distribución de fuerzas tales que tipos de fuerzas idénticos se relacionen en magnitud por medio de un factor de escala constante. A excepción de pocos casos, es imposible aplicar similitud dinámica, ya que no se pueden mantener constante a la vez los números de Reynolds, Froude, etc.²⁴ En el caso específico desarrollado se procuró mantener el mismo régimen de flujo, es decir, si la emulsión se produjo en el régimen

laminar luego de escalado el equipo se buscó lo mismo, si fue hecha la emulsión en régimen de transición se buscó que la misma pudiera ser hecha en este régimen y lo mismo para el régimen turbulento.

Para el diseño hecho, se mantuvo como parámetro de escalamiento la misma tasa de corte para aquellas emulsiones realizadas en el régimen laminar o las realizadas en el régimen de transición con un número de Reynolds muy cercano al límite entre el régimen laminar y de transición. Para el caso de las emulsiones realizadas en el régimen turbulento o en el régimen de transición con un número de Reynolds más cercano al límite entre el régimen de transición y turbulento se mantuvo como parámetro de escalamiento la misma potencia específica.

III.3.2.3 Dimensionamiento del Mezclador Dinámico

El mezclador dinámico constituye el equipo más importante para el proceso de preparación de las emulsiones, debido a que en él se dimensiona el tamaño de gota necesario para la formación de emulsiones de agua en crudo mediante el suministro de energía. A continuación se presenta detalladamente el procedimiento seguido para dimensionar dicho equipo.

III.3.2.3.1 Régimen de Mezclado

Los mecanismos de mezclado están definidos teniendo como base el régimen de flujo, bien sea laminar, de transición turbulento. El régimen de flujo se define a través del número de Reynolds, el cual relaciona la inercia del flujo del fluido con respecto a la viscosidad del mismo. Mientras más grande es el número de Reynolds, más dominante es la inercia del sistema y viceversa.

Para el caso específico del mezclado y la formación de dispersiones, el número de Reynolds se define en términos del diámetro del impulsor y de la velocidad periférica del impulsor como se muestra en la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\pi \rho N D^2}{\mu} \quad \text{Ec. 26}$$

donde:

Re: Número de Reynolds (adim)

ρ : Densidad del fluido (Kg/m³)

N: Velocidad del Impulsor (RPS)

D: Diámetro del impulsor (m)

μ : Viscosidad del fluido (Pa·s)

En la Tabla N° 9, se pueden apreciar los límites referentes a los distintos regímenes, para el caso específico del mezclado, se puede observar que en dicha tabla se nombra el parámetro P_o que es el número de potencia y que se encuentra definido en la ecuación 30, éste está relacionado al número de Reynolds. Este número de potencia es característico de cada impulsor.

Tabla N° 9. Valores del número de Reynolds para los distintos regímenes

Régimen	Reynolds (Re)
Laminar	< 100
Transitorio	$100 < Re < 6600/Po^{1/3}$
Turbulento	$> 6600/Po^{1/3}$

Para el cálculo del número de Reynolds se hace indispensable conocer el valor de la viscosidad de la emulsión que se está produciendo, las emulsiones son fluidos pseudoplásticos, por lo que su valor de viscosidad aparente va a depender de la tasa de corte a la que se esté produciendo dicha emulsión. A su vez el cálculo de la tasa de corte va a depender del tipo de impulsor que se esté usando.

Para el caso de un impulsor, en régimen laminar, la tasa de corte puede ser calculada mediante la siguiente ecuación:

$$G = A \cdot N \quad \text{Ec. 27}$$

donde:

G : Tasa de Corte (1/s)

A : constante (adim)

Para el caso específico de una turbina tipo Rushton el valor de la constante es 12.²¹

En el caso que se utilice un mezclador del tipo rotor/estator, la tasa de corte se define por la relación entre la velocidad periférica del rotor dividido por la distancia radial entre el rotor y el estator, la siguiente ecuación muestra tal expresión:

$$G = \frac{\pi ND}{h} \quad \text{Ec. 28}$$

donde:

h : distancia radial entre el rotor y el estator (m).

Como se mencionó anteriormente para un fluido pseudoplástico la viscosidad aparente varía en función de la tasa de corte y por eso con el aumento de la velocidad periférica del impulsor la viscosidad aparente se reduce. Este comportamiento hace difícil la estimación de dicha viscosidad para el cálculo del número de Reynolds y la potencia hidráulica del impulsor.²¹ La viscosidad para un fluido pseudoplástico se define según la ley de potencia como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\mu = KG^{n-1} \quad \text{Ec. 29}$$

donde K y n son constante obtenidas del reograma del fluido en un viscosímetro.

A todas y cada una de las emulsiones realizadas en el laboratorio se les midió la viscosidad aparente mediante el uso de un viscosímetro rotacional y con la información suministrada por el reograma se obtuvieron las constantes K y n para cada una de las emulsiones preparadas. Estos gráficos se encuentran en el Anexo N° 4.

Como se observó en la Tabla N° 9, para determinar el régimen de la dispersión es necesario hallar el número de potencia, este puede ser considerado como un coeficiente de arrastre o simplemente como una expresión para determinar la potencia del impulsor en términos adimensionales. Para el caso del impulsor Rushton existen gráficos estándar en donde se puede calcular el número potencia mediante el número de Reynolds. Por otro lado, no se conoce a priori cual es el número de potencia para una combinación rotor/estator dada, por lo tanto es imprescindible caracterizar directamente la potencia en función de las variables del proceso directamente.²¹ A continuación se presenta la ecuación para el cálculo del número de potencia:

$$P_o = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad \text{Ec. 30}$$

donde:

P_o : Número de Potencia (adim.)

P : Potencia de mezclado (w)

La potencia de mezclado representa la potencia que se entrega al fluido para poder formar la dispersión, la siguiente ecuación muestra como se puede calcular este valor:

$$P = P_{eje} - (P_{bombeo} + P_{fricción}) \quad \text{Ec. 31}$$

donde:

P_{eje} : Potencia medida en el eje (w)

P_{bombeo} : Potencia hidráulica debido al dispositivo (w)

$P_{fricción}$: Potencia Consumida a causa de la fricción (w)

La potencia de bombeo es baja con respecto a los demás términos, por lo que se puede despreciar; la potencia de fricción puede ser fácilmente estimada cuando el rotor gira sin carga, ya que se puede suponer que la viscosidad del aire es mucho menor que la del

fluido que esta siendo mezclado y por lo tanto la potencia consumida por arrastre es despreciable.

Una manera indirecta de medir estos valores de potencia es el cálculo de la potencia eléctrica consumida por el equipo mezclador, solo se necesita conocer entonces cual es la intensidad de corriente consumida, ya que el valor de diferencia de potencial es constante, por ende se puede determinar la potencia eléctrica mediante la siguiente expresión que corresponde al caso en el que se trabaja con corriente continua:

$$P_e = I \cdot V \quad \text{Ec. 32}$$

donde:

P_e : Potencia eléctrica (w)

I : Intensidad de Corriente (A)

V : Diferencia de Potencial (V)

El valor de diferencia de potencial se hace constante e igual 110 V, lo que varía en este caso es la intensidad de corriente consumida en el equipo mezclador utilizado para preparar las emulsiones, este equipo posee un dispositivo para visualizar esta intensidad de corriente. Se hace necesario entonces conocer la eficiencia del motor, puesto que no toda la potencia eléctrica se transforma en energía mecánica, debido a pérdidas en los engranajes del motor, la eficiencia de este motor es de 85%.

Ahora conociendo tanto el número de Reynolds como el número de Potencia, se puede determinar en que régimen se preparó cada una de las emulsiones, si se toma el promedio de los números de potencia se puede calcular el límite que establece donde comienza el régimen turbulento.

III.3.2.3.2 Escalamiento del Impulsor

III.3.2.3.2.1 Potencia del Motor

Como se mencionó anteriormente, los estados de similitud generalmente reconocidos como aplicables para los procesos de agitación son los geométricos, cinemáticos y dinámicos. Para este caso particular se decidió conservar la similitud geométrica, es decir, el equipo escalado y el original son de la misma forma, y todas las dimensiones lineales se relacionan entre sí por medio de un factor de escala constante.

Con respecto a la similitud dinámica, se mantendrá el mismo régimen de flujo del equipo original al equipo escalado, y también se mantendrá el mismo número de potencia, puesto que este número permanece constante para un mismo tipo de impulsor.

Con respecto a la similitud cinemática, se mantuvo el mismo patrón de flujo mas no fue posible mantener la misma velocidad del impulsor.

En el caso de producirse emulsiones en el régimen laminar, la tasa de corte es la responsable de la deformación de las gotas, mientras que en el régimen turbulento la energía específica es quien genera la fuerza de turbulencia responsable de la deformación de las gotas.

Para el régimen de transición no se encuentran expresiones específicas que indiquen quien es el responsable del rompimiento de las gotas, pero el “Know How” en la preparación de emulsiones indica que si el número de Reynolds es más cercano al límite del régimen laminar, entonces la tasa de corte será la responsable de la deformación de las gotas, mientras que si el número de Reynolds es mas cercano al límite del régimen turbulento la potencia específica será la responsable de la deformación de las gotas.

El caso que se consideró para el diseño fue el caso más crítico, es decir, aquél en el que se consumió la mayor cantidad de potencia. La emulsión que corresponde a este caso se preparó en régimen de transición, pero el valor del número de Reynolds se acerca al límite

del régimen turbulento, por lo tanto el parámetro escogido para el escalamiento fue la potencia específica:

$$\varepsilon_1 = \frac{P_1}{m_1} = \varepsilon_2 = \frac{P_2}{m_2} \quad \text{Ec. 33}$$

donde:

ε_1 y ε_2 : Potencia específica (w/Kg)

P_1 : Potencia empleada en el Laboratorio de Físicoquímica de Producción (w).

P_2 : Potencia a emplear en el mezclador dinámico del Laboratorio de Levantamiento Artificial (w)

m_1 : masa de emulsión empleada en el Laboratorio de Físicoquímica de Producción. (Kg)

m_2 : Masa de emulsión equivalente al volumen del mezclador dinámico

Es necesario que se mantenga el valor de potencia específica en el régimen turbulento para el mezclador escalado, para así garantizar que el mecanismo de rompimiento de las gotas sea igual y por lo tanto se pueda conseguir una emulsión con las mismas propiedades

Como se mencionó anteriormente para poder realizar el escalamiento es necesario tomar el caso más crítico, que corresponde al caso en el que se haya consumido mayor cantidad de potencia. De acuerdo a los criterios de escalamiento se debe proporcionar la misma potencia por unidad de masa.

III.3.2.3.2.1.1 Volumen del Mezclador

En el caso particular de estudio se quiere crear un mezclador dinámico que va a servir de equipo principal en un circuito de pruebas experimental donde el producto no tiene ningún tipo de valor agregado, por ello es necesario que el mezclador se alo mas económico posible, basado en esto y basado en tamaños que se consideran estándar en aplicaciones de mezclado se seleccionó como volumen del mezclador 10 l, pero para fines

de diseño y como parámetro de seguridad para la selección de la potencia del motor, el volumen de diseño fue de 15 l

Recordando que se debe mantener la misma potencia específica y conociendo la densidad del la densidad del fluido, se obtiene la siguiente expresión:

$$P_2 = m_2 \cdot \varepsilon_2 \quad \text{Ec. 34}$$

El valor aquí obtenido corresponde a la potencia de mezclado necesaria para producir emulsiones con las mismas propiedades a las preparadas en el laboratorio, por lo tanto es necesario que el motor del mezclador sea capaz de generar esta potencia.

III.3.2.3.2.2 Flujo Másico

Las futuras pruebas en el nuevo circuito a diseñar contemplará la producción de hasta 9000 l. de emulsión para cumplir con una matriz de pruebas en la bomba electrosumergible, por lo tanto esta cantidad debe ser producida en un tiempo prudencial, y acorde al volumen del mezclador dinámico, por ello se decidió que se prepararían 15 Kg en un período de un (1) minuto, con lo que sería posible producir la cantidad antes mencionada en 600 minutos que representan 10 horas. En función de esto el flujo másico sería:

$$Fm = \frac{15Kg}{1 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60s} = 0,25Kg / s \quad \text{Ec. 35}$$

donde

Fm : Flujo másico (Kg/s).

III.3.2.3.2.3 Diámetro del Impulsor

La ecuación 30, permite describir la relación de la potencia con el Número de Potencia, el diámetro del impulsor, la densidad del fluido y la velocidad del impulsor. Despejando el diámetro se obtiene:

$$D = \sqrt[5]{\frac{P}{P_0 \cdot N^3 \cdot \rho}} \quad \text{Ec. 36}$$

Con la ecuación 36 es posible obtener el valor del diámetro para el nuevo impulsor, el valor del número de potencia se conserva para así preservar el principio de similitud dinámica, la densidad de la mezcla es la misma ya que se esta preparando la emulsión bajo las mismas condiciones de trabajo, la potencia es la calculada en la ecuación 34, por último, es necesario determinar la velocidad a la cual se va a realizar la emulsión, esta velocidad debe ser tal, que pueda ser desarrollada por el motor a ser utilizado, y de igual modo se debe asegurar que con tales parámetros el régimen sea transitorio o turbulento para que así el proceso se desarrolle de manera similar.

Con esta medida se puede proceder a realizar el escalamiento, preservando la similitud geométrica, se obtiene así la siguiente relación que es aplicable a todas y cada una de las medidas del impulsor:

$$\frac{D_1}{h_1} = \frac{D_2}{h_2} \quad \text{Ec. 37}$$

donde:

D_1 : Diámetro del impulsor usado en el laboratorio (m)

h_1 : Medida arbitraria h del impulsor usado en el laboratorio (m)

h_2 : Medida arbitraria h del impulsor escalado (m)

III.3.2.3.3 Recipiente

El recipiente que contendrá al impulsor debe ser de tipo cilíndrico, es importante recalcar que se está realizando la emulsión utilizando un sistema de mezclado del tipo rotor estator, por lo que la diferencia de diámetro entre el recipiente y el mezclador es muy pequeña, en la Figura N° 36, se puede apreciar una representación esquemática del sistema de mezclado rotor/estator, en la que D, representa el diámetro del impulsor y h representa la

separación existente entre el rotor y el estator. Para que el sistema sea considerado de este tipo se debe cumplir que $h/D \ll 1$.

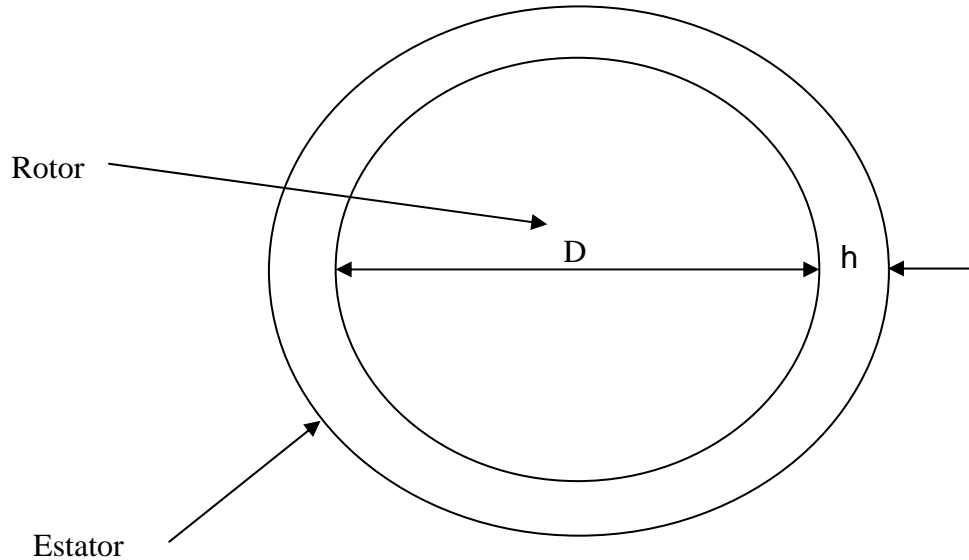


Figura N° 36. Diagrama esquemático de la sección transversal de la sección de un mezclador rotor/estator.

III.3.2.3.3.1 Diámetro interno

Como ya se ha mencionado varias veces se debe conservar la similitud geométrica, por lo tanto, esta separación entre el rotor y el estator del modelo escalado será proporcional a la existente en el modelo usado en el laboratorio, utilizando la ecuación 37 y despejando h_2 , y utilizando los valores originales del modelo del laboratorio se obtiene:

$$h_2 = \frac{D_2 \cdot h_1}{D_1} \quad \text{Ec. 38}$$

Con base en esta premisa se puede determinar entonces fácilmente el valor del diámetro interno del recipiente:

$$d_{in} = D_2 + 2h_2 \quad \text{Ec. 39}$$

donde:

d_{in} : Diámetro interno del recipiente (m)

III.3.2.3.3.2 Altura

De igual modo, se hace necesario determinar la altura del recipiente del mezclador que va a depender del volumen del recipiente en sí. Como se mencionó anteriormente el volumen de este mezclador será de 10 litros, que está dentro de los volúmenes típicos para este tipo de aplicaciones; con esta información y sabiendo que el tanque es de forma cilíndrica se puede determinar la altura del tanque:

$$h_t = \frac{4 \cdot V_t}{\pi \cdot d_{in}^2} \quad \text{Ec. 40}$$

donde:

h_t : Altura del tanque (m)

V_t : Volumen del tanque (m³)

III.3.2.3.3.3 Diámetro externo.

El diámetro externo se puede determinar conociendo el espesor de las paredes, para este caso en específico, el grosor de dichas paredes se estima en 3/16”²⁵, que equivale a 0,005m:

$$d_{ex} = d_{in} + 2 \cdot e_p \quad \text{Ec. 41}$$

donde:

d_{ex} : Diámetro externo del recipiente (m)

e_p : espesor de la pared (m)

III.3.2.4 Reproducción de Emulsiones en el Mezclador Dinámico

En esta sección se describe el procedimiento utilizado para determinar la velocidad a la que debe operar el impulsor del mezclador dinámico con el objeto de reproducir los resultados obtenidos con respecto a las propiedades de las emulsiones a nivel del laboratorio de Físicoquímica de Producción.

Es importante recordar que en el caso de que la emulsión se realice en el régimen turbulento o en el régimen de transición cercano al límite con el régimen turbulento la potencia específica va a ser el parámetro de igualdad para obtener la misma emulsión, mientras que para el régimen laminar o el régimen de transición cercano al límite con el régimen laminar, el parámetro que debe permanecer constante es la tasa de corte.

Para el caso de las emulsiones realizadas en régimen laminar y con el impulsor Rushton de 6 aspas se calcula primero la tasa de corte utilizando la ecuación 27, para las realizadas con el impulsor T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type se utiliza la ecuación 28 para el cálculo de la tasa de corte.

Para el caso en el que se debe conservar la tasa de corte, ya que el equipo diseñado es del tipo rotor/estator, se utiliza la ecuación 28 para el cálculo de la velocidad despejando N :

$$N_2 = \frac{h_2 \cdot G}{\pi \cdot D_2} \quad \text{Ec. 42}$$

donde:

N_2 : Velocidad del impulsor en la escala 2 (RPS)

Los valores de G son los correspondientes al utilizar las ecuaciones 27 y 28 de acuerdo al caso, el valor de D_2 corresponde al diámetro del impulsor escalado, y el valor de h_2 sería la distancia radial entre el rotor y el estator del modelo escalado.

Para el caso de las emulsiones realizadas en el régimen de turbulento o de transición cercano al límite del régimen turbulento, tomando la ecuación 30, se puede despejar el término de velocidad N :

$$N_2 = \sqrt[3]{\frac{P_1 \cdot m_2 / m_1}{P_o \rho (D_2)^5}} \quad \text{Ec. 43}$$

Los valores de P_1 y P_o han sido previamente calculados, el valor de D_2 corresponde al diámetro del impulsor escalado. El valor de m_1 corresponde a la masa de emulsión preparada en el laboratorio de fisicoquímica de producción, es decir, 0,26939 Kg., mientras que el valor de m_2 corresponde a la masa de emulsión equivalente al volumen del mezclador dinámico MD-101, es decir, 10Kg.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en este trabajo especial de grado, de igual modo se presenta su respectiva discusión. Primeramente se discute lo relacionado a la formación de emulsiones a nivel del laboratorio de Fisicoquímica de Producción de PDVSA-Intevep, específicamente lo relacionado a las condiciones de formación (velocidad y tiempo), la estabilidad estática y dinámica de las mismas, y las variaciones producidas en la viscosidad y en el diámetro promedio de gota originado por la variación de ciertas variables: porcentaje dilución con Diesel, porcentaje de agua dispersado, adición de surfactantes, etc.

Seguidamente se presenta una descripción del actual circuito de pruebas existente en el laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep que corresponde a la revisión de las facilidades existentes. Luego se presenta la propuesta del nuevo circuito de pruebas con sus modificaciones y se hace una descripción del esquema de formación de emulsiones que incluye el diseño en mayor detalle del recipiente de formación de emulsiones. Seguidamente se muestra lo referente a las condiciones de operación para reproducir a escala piloto las emulsiones realizadas en el laboratorio.

IV.1 EMULSIONES

IV.1.1 Formación de Emulsiones

Como se explicó en el capítulo precedente se prepararon emulsiones de agua en crudo usando como fase continua crudo Cerro Negro diluido con tres proporciones de Diesel para simular viscosidades de crudos pesados, medianos y livianos. Tales proporciones de diesel fueron de 7,5% para simular la viscosidad de un crudo pesado, 30% para simular la viscosidad de un crudo mediano y 50% para simular la viscosidad de un crudo liviano. La utilización de un crudo en lugar de un aceite mineral se basó principalmente en el hecho de que por poseer mayor heterogeneidad se convierte en un mejor fluido para modelar condiciones de pozo y con ello se consigue hacer un mejor estudio sistemático, se empleó

el Diesel para preservar la composición química de la fase continua. El tiempo de preparación de todas estas emulsiones fue de 10 minutos. Este tiempo se escogió para evitar adicionar una variable adicional y su selección fue hecha considerando estudios previos de laboratorio que corroboran que es un tiempo suficiente para dispersar agua en crudo. El criterio utilizado para la formación de dichas emulsiones fue simplemente lograr dispersar el agua deseada y obtener una emulsión que fuera estable ante condiciones de almacenamiento de 50 °C por un período de una semana. Se escogió esta temperatura debido a que es una temperatura que cae en el rango de temperaturas típicas a fondo de pozo que oscila entre 100 y 200 °F (37,8 y 93,3°C). Para lograr este fin se variaron las condiciones de mezclado, específicamente el impulsor utilizado y la velocidad de formación de las emulsiones. También se adicionaron en algunos casos surfactantes para conseguir la emulsificación de las gotas de agua.

En las siguientes tablas se muestran las emulsiones preparadas y se especifica el tipo de impulsor utilizado y la velocidad con la que se prepararon tales emulsiones.

Tabla N° 10. Velocidades del Impulsor obtenidas en la formación de Emulsiones para la relación Crudo/Diesel 92,5:7,5

Porcentaje de Agua dispersado (%)	Tipo de Impulsor	Viscosidad de la fase Externa @ 50 °C (cP)	Velocidad del Impulsor (RPM)	Diámetro Promedio de Gota (µm)
5	Rushton de 6 aspas	5841	1000	2,6
10			1000	4,8
20			2500	4,1
30			3000	3,6

En la Tabla N° 10, se presenta la información básica referente a la formación de emulsiones teniendo como fase continua crudo Cerro Negro diluido con 7,5 % de Diesel, la viscosidad de la fase interna a la temperatura de formación, es decir, a 50° C es de 5841 cP, lo que lo convierte en un fluido muy viscoso y por ende la dispersión se hace en régimen laminar. En este régimen, la tasa de corte es la responsable del rompimiento de las

gotas y estas se rompen por un corte rotacional ya que la fase dispersa que en este caso es agua tiene una viscosidad mucho menor a la de la fase continua.²¹

Igualmente, se puede observar que a medida que se incrementa el porcentaje de agua a dispersar aumenta la velocidad del impulsor, esto se hace con el fin de incrementar la tasa de corte y así poder dispersar con mayor eficiencia mayores cantidades de agua. El impulsor utilizado fue uno del tipo Rushton de 6 aspas el cual provee mezclado radial. La formación de la emulsión se va a ver favorecida por el hecho de que la fase externa sea de elevada viscosidad, por lo que un mezclado del tipo radial, que si se quiere es un tipo de mezclado sencillo, va a ser suficiente para conseguir dispersar el agua.

Tabla N° 11. Velocidades del Impulsor obtenidas en la formación de Emulsiones para la relación Crudo/Diesel 70:30

Porcentaje de Agua dispersado (%)	Tipo de Impulsor	Viscosidad de la fase Externa @ 50 °C (cP)	Velocidad del Impulsor (RPM)	Diámetro Promedio de Gota (µm)
5	T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type	251	2000	6,5
10			2000	6,7
20			4000	6,6
30			5000	4,8

En la Tabla N° 11, se tiene la información referente a la formación de emulsiones usando como fase continua crudo Cerro Negro diluido en 30% de Diesel, en este caso la viscosidad de la fase continua es de 251 cP, lo que la hace mucho menos viscosa que el caso anterior, esto trae como consecuencia que la dispersión no se realice en régimen laminar sino en régimen de transición o en régimen turbulento. En el régimen turbulento la potencia específica (ϵ), es decir, la potencia por unidad de masa, va a ser la causante de la deformación de las gotas y no la tasa de corte. Se observa igualmente que se necesita mayor velocidad en el impulsor a medida que aumenta la cantidad de agua a dispersar y estos se debe a que existe un mayor requerimiento de potencia para conseguir dispersar mayor porcentaje de agua.

Se puede observar igualmente que en este caso se utilizó como impulsor el T.K. Homo Mixer Mark II, este es un impulsor del tipo rotor-estator y mientras está en funcionamiento succiona el fluido. Este tipo de impulsor proporciona un mezclado mucho más intenso el cual tiene que aplicarse debido a ciertas condiciones adversas: la fase externa no es muy viscosa, y solo se está contando con los surfactantes naturales que existen en el crudo para disminuir la tensión interfacial para así romper las gotas con mayor facilidad y estos se encuentran en menor concentración debido a la dilución hecha con Diesel.

Tabla N° 12. Velocidades del Impulsor obtenidas en la formación de Emulsiones para la relación Crudo/Diesel 50:50

Porcentaje de Agua dispersado (%)	Tipo de Impulsor	Viscosidad de la fase Externa @ 50 °C (cP)	Velocidad del Impulsor (RPM)	Diámetro Promedio de Gota (μm)
5	T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type	41,1	5500	2,3
10			6500	2,8
20			7500	3,1
30			8500	4,0

En la Tabla N° 12, se tienen los resultados obtenidos en la formación de emulsiones usando como fase externa crudo Cerro Negro diluido en 50% de Diesel, de igual manera que en los casos anteriores a medida que aumenta el porcentaje de agua a dispersar, aumenta la velocidad del impulsor, que es necesaria ya que el incremento en la cantidad de agua hace necesario que se imprima mayor potencia al fluido.

La reducción en la concentración de surfactantes naturales ocasionada por la dilución con 50% de Diesel y el hecho de que la fase continua es muy poco viscosa no favorece la formación de las emulsiones, por lo tanto se recurrió a la utilización del surfactante comercial TOFA (Tall oil fatty acids) y MEA (Mono Etanol Amina). La TOFA suple el déficit los surfactantes naturales del crudo por ser una mezcla de ácidos grasos y la MEA va a permitir la formación de carboxilatos. La combinación de la TOFA y de su sal de MEA va a poseer una mayor actividad interfacial y por ello es posible obtener emulsiones mucho más estables.

De igual forma y como se explicó en el caso anterior se utilizó como impulsor el T.K. Homo Mixer Mark II, con este se consigue un mezclado bastante intenso que permite formar las emulsiones para contrarrestar las condiciones poco favorables.

Como se puede observar en las tres tablas mostradas con anterioridad todas las dispersiones realizadas poseen un diámetro de gota mucho menor a 25 μm , por lo que todas estas dispersiones pueden ser consideradas como emulsiones con lo que se puede afirmar que se consiguieron las condiciones necesarias en el laboratorio de Fisicoquímica de producción para lograr obtener emulsiones similares a las existentes en campo.

IV.1.2 Estabilidad Estática de las Emulsiones

La estabilidad estática se refiere principalmente a la resistencia a la coalescencia que pueden presentar las emulsiones ante el almacenamiento. En este caso la temperatura de almacenamiento fue de 50 °C que fue la misma temperatura a la que se formaron las emulsiones, el tiempo de estudio fue de 7 días que es un tiempo superior al que permanece los fluidos en el pozo, aunque algunas emulsiones coalescieron antes de este tiempo. Es importante resaltar que el término de estabilidad es relativo puesto que las emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables, por lo que tarde o temprano la tendencia va a ser la separación de las fases, por lo tanto, la estabilidad puede ser estudiada refiriéndose a un instante de tiempo definido.

Es importante que las emulsiones realizadas no coalescan en el tiempo en el cual van a ser almacenadas, por eso el tiempo de duración de las pruebas de estabilidad estática tiene que ser superior al tiempo que se espera que estas emulsiones estén almacenadas.

Para el estudio de la estabilidad estática se midieron dos propiedades de la emulsión, el diámetro promedio de gota y la viscosidad de la emulsión, ambas fueron hechas con respecto al tiempo (7días). Con las emulsiones preparadas en el laboratorio se busca simular las emulsiones existentes en los pozos, estas emulsiones no se producen bajo

condiciones estrictas ni bajo variables controladas por lo que los diámetros de gota pueden variar en un amplio rango. En realidad lo que se busca es mantener una medida en el diámetro de gota por debajo de los 25 μm , para asegurar que se está formando una emulsión, y se busca de igual modo que ésta sea estable por un determinado periodo de tiempo.

A continuación se presentan una serie de Gráficos en donde se muestra la variación de tamaño de gota y de viscosidad ante las condiciones de almacenamiento para las distintas emulsiones preparadas:

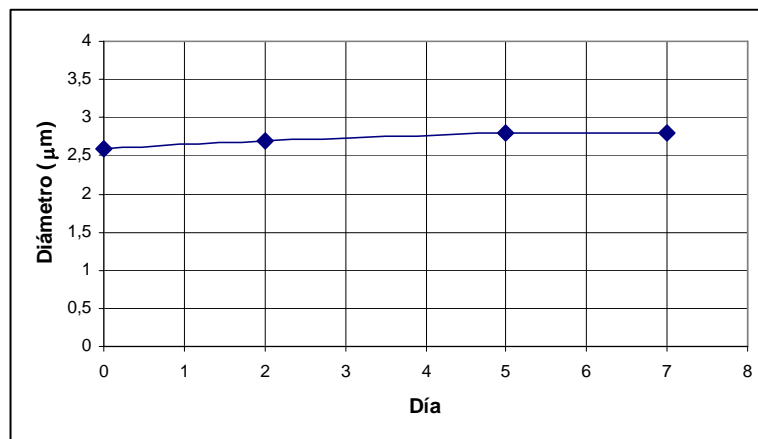


Gráfico N° 6. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 1000RPM

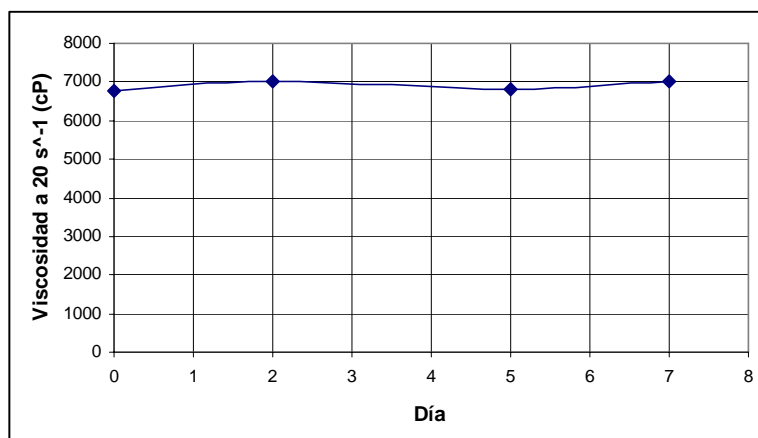


Gráfico N° 7. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 1000RPM. Temperatura: 50°C

En el Gráfico N° 6 y en el Gráfico N° 7 se muestran respectivamente la variación del diámetro de gota y de la viscosidad aparente para la emulsión señalada en los rótulos. En dicha emulsión se consiguió un diámetro promedio de $2,6 \mu\text{m}$ y una viscosidad aparente de 6765 cP (50°C y 20 s^{-1}). Este diámetro se mantuvo en los 7 días casi constante, aumentando tan solo hasta $2,8 \mu\text{m}$, esta variación es insignificante y se puede atribuir al error implícito del equipo al hacer la medición de esta propiedad. Por otro lado, con respecto a la viscosidad, el valor a través del tiempo se mantiene constante alrededor de los 7000 cP , atribuyendo de igual modo las pequeñas variaciones al error causado por el viscosímetro al hacer la medida.

Esta emulsión posee tan solo 5% de agua por lo que las gotas tienen muy poco o ningún contacto las unas con las otras y en consecuencia el fenómeno de coalescencia no está presente, en realidad la fase interna posee una interacción con la fase externa lo que contribuye a la estabilidad de la emulsión. La viscosidad de la fase continua es de 5841 cP , lo cual por ser tan alta va a dificultar la movilidad de las gotas en el seno de este fluido dificultando así la coalescencia de las gotas. Esta dificultad se explica fácilmente citando la ley de Stokes (ecuación 18) donde el término de fuerza de rozamiento es directamente proporcional con el término de viscosidad, lo que quiere decir que mientras mayor sea esta última mayor será esta fuerza de rozamiento. Si el movimiento de las gotas sólo se atribuye a la acción de la fuerza de gravedad entonces esta fuerza de rozamiento sería la que se opondría al movimiento de las partículas y al ser mayor entonces la movilidad de las mismas sería más tortuosa y por lo tanto sería más difícil la coalescencia.

Si se observa la ecuación 19, la velocidad de sedimentación es inversamente proporcional a la viscosidad del fluido por el que se mueve la gota, por lo tanto a altas viscosidades la velocidad de sedimentación será bastante pequeña.

No se puede aplicar directamente la ley de Stokes en el caso de las emulsiones debido a que existen otras fuerzas que originan el movimiento de las gotas como lo es la

energía térmica y lo hidrodinámica en sí, pero es válida para explicar la influencia de la viscosidad de la fase externa en la estabilidad estática de estas emulsiones.

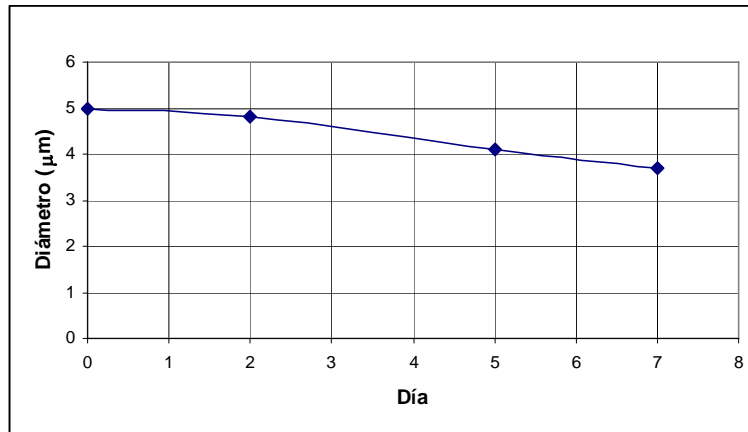


Gráfico N° 8. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 1000RPM

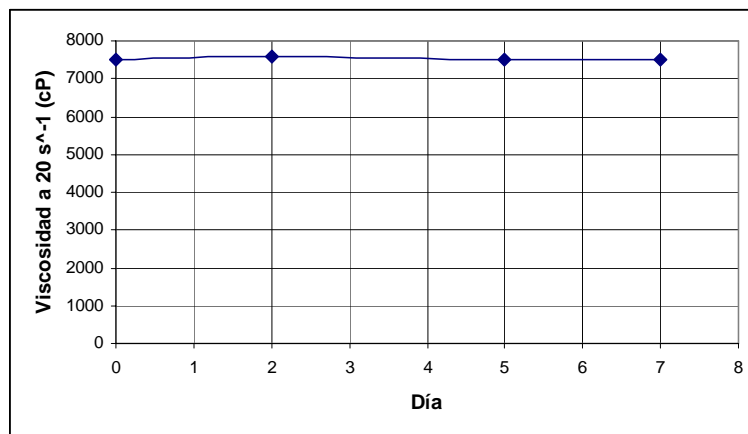


Gráfico N° 9. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 1000RPM. Temperatura: 50°C

En el Gráfico N° 8 y en el Gráfico N° 9 se muestra la variación de tamaño de gota y viscosidad para la emulsión señalada en los rótulos. Como se puede observar el diámetro de gota disminuye desde 5 µm el día 0 hasta 3.7 µm el día 7. Esto es un comportamiento atípico ya que lo que se espera es un aumento de diámetro a medida que pasa el tiempo.

Es de suma importancia señalar que cuando se forma una emulsión hay dos procesos que compiten, que son el proceso de rompimiento de las gotas y el proceso de coalescencia de las mismas, se llega a un equilibrio dinámico cuando el proceso de rompimiento de gotas se iguala al proceso de coalescencia hasta alcanzar un diámetro mínimo de gota que no variará en el tiempo. A medida que se rompen las gotas de agua por la acción del cizallamiento del impulsor, el surfactante que se encuentra en la fase orgánica migra a la interfase entre la nueva gota de agua y dicha fase orgánica, se adsorbe y se forma una película interfacial y en consecuencia una barrera frente a la coalescencia de estas gotas; a medida que se forman más gotas se va consumiendo este surfactante. Una vez agotado el surfactante será imposible seguir reduciendo el diámetro de gota por lo que este se mantendrá constante a medida que pase el tiempo a pesar del cizallamiento.

En este caso en particular, se puede decir que la emulsión se formó en un estado de no equilibrio dinámico, es decir, en un punto donde hubiese sido posible reducir el diámetro de gota si se hubiese cizallado la muestra por mucho más tiempo. Es importante destacar que tener una emulsión formada en este estado no es un error, porque el fin perseguido era poder simular las emulsiones producidas en campo, específicamente las que se forman en el pozo productor. Estas emulsiones se forman por condiciones poco rigurosas y sin ningún tipo de variable controlada, principalmente por las condiciones de presión y temperatura existentes en el trayecto desde que el fluido se mueve desde el yacimiento hasta el pozo.

Una vez preparada la emulsión es almacenada a 50 °C, cada vez que se hizo una medida la mezcla se agitó con una varilla de vidrio. Tanto las condiciones térmicas como el cizallamiento producido al agitar la emulsión pueden contribuir al rompimiento de las gotas y por ende se origina una reducción en el diámetro promedio de dicha emulsión y por ello la tendencia de la curva en el Gráfico N° 8

Con respecto a lo mostrado en el Gráfico N° 9, se puede apreciar que es casi invariable la viscosidad con respecto al tiempo, a pesar de que sí hay cambio en el diámetro de gota, estas pequeñas diferencias no afectan significativamente a la medida de viscosidad

y las pequeñas discrepancias se pueden atribuir principalmente a los errores asociados a la medición en sí.

A continuación, en el Gráfico N° 10 y en el Gráfico N° 11 se observan respectivamente las variaciones de diámetro de gota y de viscosidad con respecto al tiempo de la emulsión identificada en los rótulos.

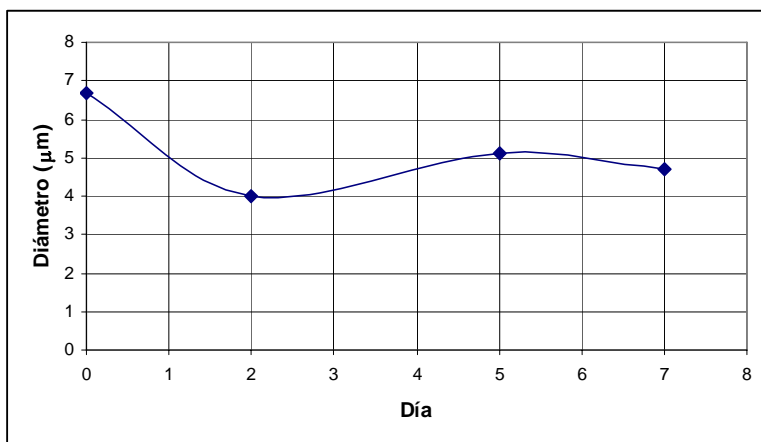


Gráfico N° 10. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM

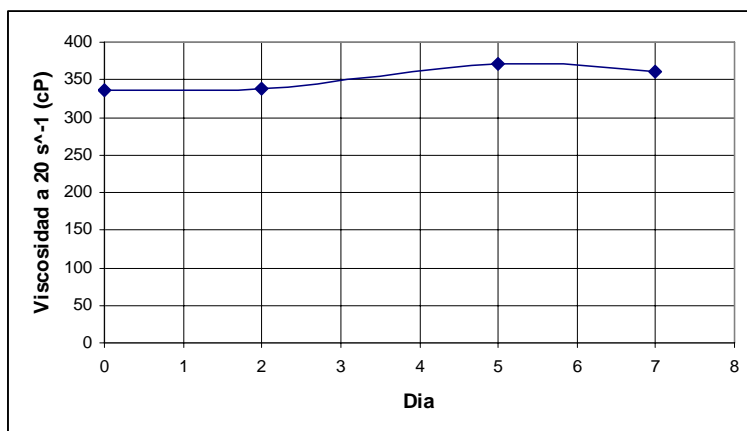


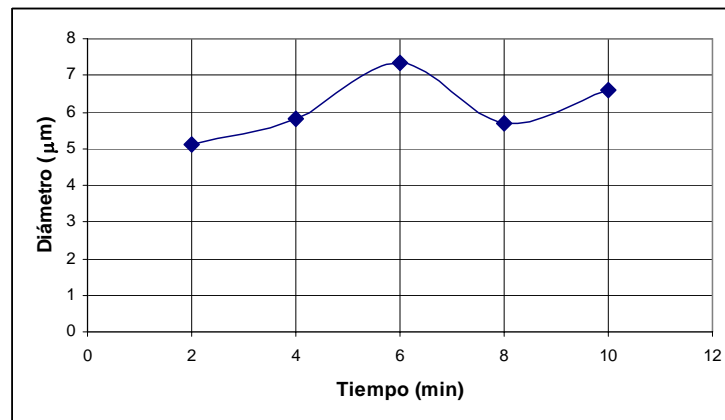
Gráfico N° 11. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM.

Temperatura: 50°C

El diámetro promedio en el día 0 es de $6,7 \mu\text{m}$, luego este diámetro disminuye hasta $4 \mu\text{m}$ el día 2 para luego aumentar hasta $5.1 \mu\text{m}$ el día 5 para por último disminuir nuevamente en el día 7 a $4.7 \mu\text{m}$. Aquí nuevamente se encuentra un caso atípico en el que no hay un comportamiento definido.

Como se mencionó anteriormente, este aumento y descenso en el tamaño de gota se puede atribuir a que la emulsión se formó en una condición de no equilibrio dinámico. Se hubiese necesitado de un tiempo mayor al momento de formar la emulsión para poder alcanzar este equilibrio, pero nuevamente es importante señalar que las emulsiones que se quieren simular también se forman en condiciones de no equilibrio ya que no existe un mezclado severo como tal.

Para dar sustento al punto de que la emulsión se formó en un estado de no equilibrio dinámico, a continuación se presenta la cinética de formación para la emulsión presentada en el Gráfico N° 10, esta gráfica describe como es la variación en el diámetro de gota a medida que la muestra esta sometida al proceso de cizallamiento por parte del impulsor.



**Gráfico N° 12. Cinética de formación de Emulsión. Relación Crudo/Diesel: 70:30.
Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM**

En el Gráfico N° 12, se observa como es la variación del diámetro en intervalos de dos minutos. En el minuto dos el diámetro promedio es de 5,1 μm el cual aumenta en el minuto cuatro a 5,8 μm y en el minuto seis a 7,3 μm , como se mencionó anteriormente, en la formación de emulsiones compiten el proceso de coalescencia de las gotas con el proceso de rompimiento de las mismas, para los primeros seis minutos domina el proceso de coalescencia el cual se evidencia por el aumento del diámetro promedio. Luego en el minuto ocho el diámetro disminuye a 5,7 μm para aumentar nuevamente en el minuto diez a 6,6 μm . En la etapa del minuto seis al ocho se puede decir que domina el proceso de rompimiento de las gotas, pero al llegar al minuto diez el aumento de diámetro sugiere que nuevamente la coalescencia es el proceso dominante. Los altos y los bajos en el diámetro promedio de gota le confiere irregularidad a la curva, con lo que se puede concluir que efectivamente la emulsión se forma en una condición de no equilibrio dinámico.

Esta tendencia de aumento y descenso del diámetro mostrada en el Gráfico N° 10 es causada igualmente a la alta polidispersidad de la emulsión, es decir, a una amplia distribución de tamaños de gota. Debido a que la emulsión se formó en una condición de no equilibrio existe una amplia gama de tamaños de gota, la cual se observa en el Gráfico N° 13, en el que se puede observar que la distribución es bastante polidispersa tanto para el día 0 como para el día 5 y también para ambos días es bastante irregular. Se puede observar que en el día 5 las barras son muchos mas altas que en el día 0, e inclusive se puede observar que la amplitud de las barras es un poco mayor en el día 5 con respecto al día 0. Ambas cosas son muestra de una falta de homogeneidad en la muestra.

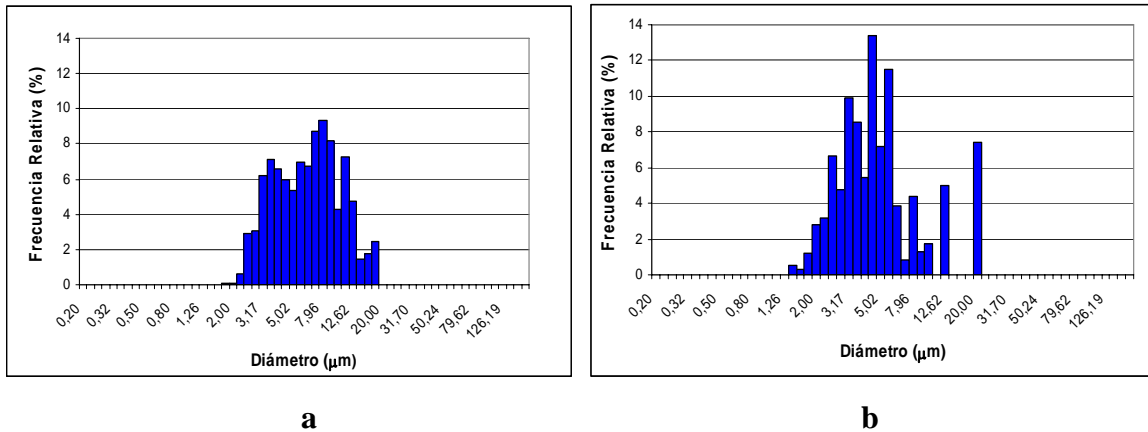


Gráfico N° 13. Distribución de Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM. a) Día 0. b) Día 5

Para sustentar esto, en la Tabla N° 13, se encuentra la información estadística correspondiente a los mismos días que los gráficos precedentes. Para el caso del día cero, se puede observar que el 90% de las gotas tienen un tamaño inferior a 12,8 μm y para el caso del día cinco, el 90% de las gotas tienen un diámetro menor a 13,4 μm , esto demuestra que hay una gran cantidad de gotas que tienen un tamaño significativo que va a afectar al momento de realizar la media geométrica y por lo tanto se va a ver reflejado en el diámetro promedio de la muestra.

Tabla N° 13. Estadísticas Referentes a la distribución de Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM. Día 0 y Día 5.

Día 0		Día 5	
Porcentaje de Gotas Contabilizado (%)	Diámetro Promedio (μm)	Porcentaje de Gotas Contabilizado (%)	Diámetro Promedio (μm)
10	3,4	10	2,6
50	6,9	50	4,7
90	12,8	90	13,4

La gran variedad de tamaño de gotas, es decir, la polidispersidad de la emulsión, se puede decir que es una consecuencia de que la emulsión haya sido formada en una condición de no equilibrio.

Por otro lado en el Gráfico N° 11, se observa la variación de la viscosidad con respecto a tiempo bajo las condiciones de temperatura y cizallamiento allí identificadas. En general se observa una tendencia poco variable que sitúa esta viscosidad en unos 350 cP en promedio, nuevamente se puede apreciar que los pequeños cambios en los diámetros de gota no afectan significativamente la viscosidad de la emulsión.

La misma polidispersidad de la emulsión puede ocasionar que el muestreo que se hace para poder realizar la medida del diámetro de gota sea distinto, por más que se intente homogeneizar la muestra en sí, existen regiones en las que se encuentran mayores diámetros de gota y regiones donde el diámetro es menor y depende del azar en donde se tome la muestra para su posterior análisis.

A continuación en la Tabla N° 14, se muestra las emulsiones preparadas con dos de las diluciones y su respectivo día de coalescencia

Tabla N° 14. Estabilidad Estática de Emulsiones. Día de Coalescencia

Dilución (Crudo : Diesel)	Porcentaje de Agua dispersado (%)	Día en el que coalesció
92,5:7,5	5	Luego del 7°
	10	Luego del 7°
	20	Luego del 7°
	30	Luego del 7°
70:30	5	Luego del 7°
	10	Luego del 7°
	20	Luego del 7°
	30	Día 3

Todas estas emulsiones que se realizaron en el laboratorio, independientemente de su comportamiento durante el tiempo, cumplen con la premisa de poseer un diámetro de gota por debajo de los 25 μm (Tabla N° 10 y Tabla N° 11), lo que las convierte en emulsiones, por lo que se puede afirmar que se logró reproducir las condiciones de ciertas emulsiones que se forman a fondo de pozo por lo que pueden utilizadas para el estudio de su comportamiento frente al bombeo electrosumergible que es el objetivo principal de este trabajo. Se puede apreciar que de estas emulsiones, solo uno de ellas no resistió las condiciones de almacenamiento y coalesció al tercer día, por lo que no será posible almacenar por tanto tiempo dicha emulsión.

Los gráficos de estabilidad estática de las otras emulsiones hechas diluyendo el crudo cerro Negro con 7,5 y 30% de Diesel se encuentran en el Anexo N° 3.

IV.1.2.1 Adición de Surfactantes

Al realizar la dilución con 50% de diesel, se comenzaron a presentar problemas para incorporar agua al sistema, inclusive con los menores porcentajes, esto debido a la reducción de la proporción de surfactantes naturales lo que impide la estabilización de gotas de fase discontinua y también la disminución en la viscosidad de la fase externa, lo que aumenta la probabilidad de la coalescencia de las gotas, ya que la movilización de las mismas por el seno de la fase continua se hace mucho menos tortuosa y también porque la energía de mezclado se aprovecha mucho menos cuando la viscosidad es menor, ya que esta energía se dispersa más en forma de calor.

Motivado a la disminución de surfactantes naturales en el sistema crudo/ diesel se decidió adicionar TOFA (Tall oil fatty acids) a la fase orgánica, el cual es una mezcla de ácido oleico y linoleico que simula muy bien la composición química de los surfactantes naturales contenidos en el crudo Cerro Negro. Al formular dichas emulsiones sí se logró dispersar pequeños porcentajes de agua solamente, pero ésta se separaba muy rápidamente, debido a que la TOFA en su forma de ácido tiene muy pocas propiedades de surfactante. Se ha observado que la TOFA en su forma de sal o mezcla del ácido y su sal de TOFA posee

mejor propiedades de surfactante, al igual que los surfactantes naturales. Por tal motivo se decidió generar las sales de TOFA añadiendo una amina orgánica como la MEA (mono etanol amina) a la fase acuosa, con el fin de aumentar el pH del agua y promover la formación de la sal de TOFA (carboxilatos).

La amina permite la disociación del agua, permitiendo que se formen iones OH^- que va a traer como consecuencia un aumento en el pH del agua, lo que le va a dar un carácter básico a la misma. Por otro lado la fase orgánica está compuesta por una serie de ácidos y adicionalmente la TOFA agregada, una vez que el agua se pone en contacto con la fase orgánica se va a promover la formación de carboxilatos, que poseen mayor actividad interfacial, por lo que éstos migran más fácilmente a la interfase.

Se prepararon emulsiones donde se emulsionó 5 y 10% de agua, utilizando una concentración de TOFA de 5% y una concentración de MEA de 0.126%, estas concentraciones fueron determinadas variando las proporciones de MEA y de TOFA, evitando conseguir emulsiones del tipo O/W.

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a la variación de diámetro de gota y de viscosidad aparente con respecto al tiempo para una emulsión con fase continua diluida en 50% de diesel y con 10% de agua emulsionada.

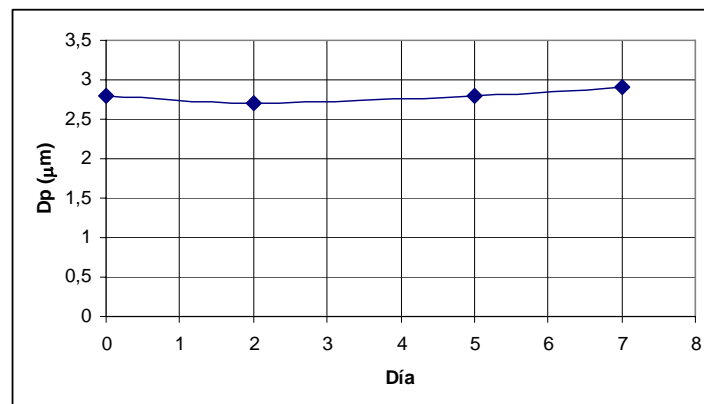


Gráfico N° 14. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0.126% MEA.

En el Gráfico N° 14, se puede observar la variación del tamaño de gota con respecto al tiempo, se puede observar que el diámetro de gota se mantiene constante durante los 7 días, siendo el valor promedio de $2,8 \mu\text{m}$, con variaciones de tan solo $0,1 \mu\text{m}$ que pueden ser atribuidas a los errores asociados al hacer la medición de dicha propiedad. La adición de TOFA y la promoción de la formación de carboxilatos permiten tener este sistema que es de suma estabilidad, ya que no hay una variación apreciable en los 7 días, esta combinación de TOFA y su sal, además de los surfactantes naturales y su sal, permiten una mayor interacción con la fase acuosa, por lo que es posible estabilizar esta cantidad de agua por el tiempo requerido.

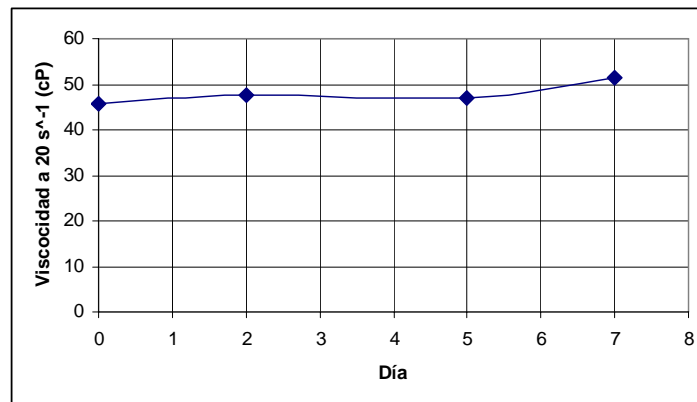


Gráfico N° 15. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0,126 MEA. Temperatura: $50 \text{ }^\circ\text{C}$.

De igual modo en el Gráfico N° 15, se puede observar la variación de la viscosidad aparente con respecto al tiempo, donde de igual modo se puede observar que esta se mantiene bastante constante, con un valor promedio de $47,9 \text{ cP}$ a 50°C y 20s^{-1} de tasa de corte. Al no haber variaciones significativas en el diámetro promedio de gota no habrá tampoco variaciones en la viscosidad aparente de la emulsión. ¹⁴

Luego se prosiguió a formar una nueva emulsión con 20% de agua, pero en esta ocasión no se consiguió una emulsión W/O, sino que se consiguió una emulsión múltiple del tipo O/W/O, en la Figura N° 37 se puede apreciar la misma.

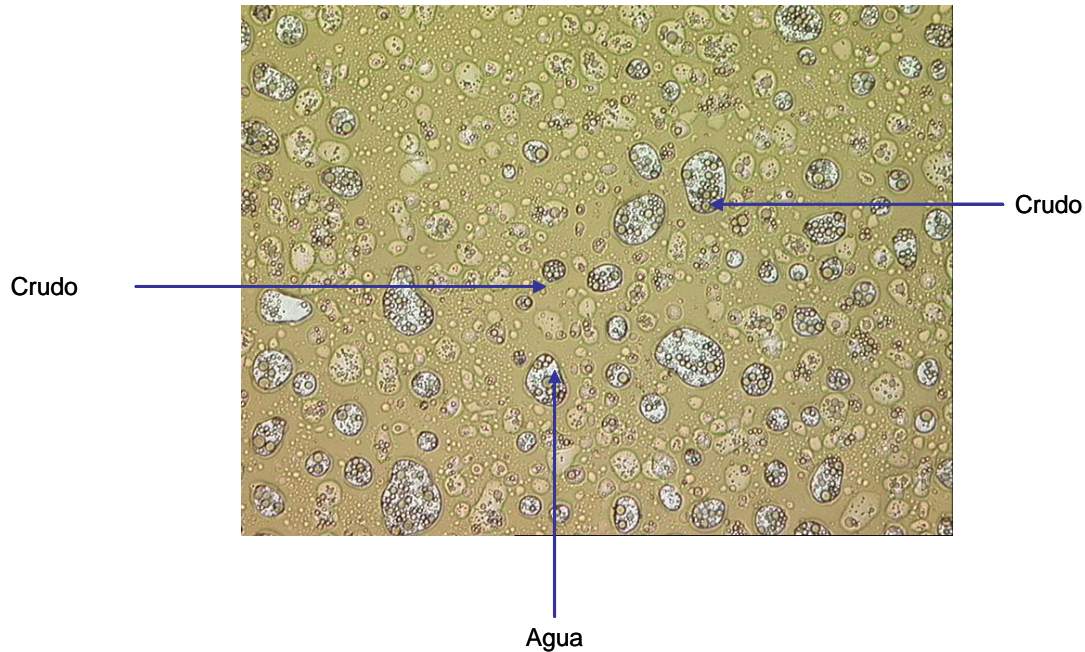


Figura N° 37. Emulsión Múltiple O/W/O.

En un sistema crudo - agua – surfactante, existen varias interacciones, están las interacciones que se dan entre sí entre las moléculas de la fase no polar, las interacciones que se dan entre las moléculas de la fase polar entre sí, las interacciones entre la parte lipofílica del surfactante y las moléculas de la fase no polar, las interacciones entre la parte hidrofílica del surfactante y las moléculas de la fase polar, y también podemos mencionar las interacciones existentes entre la partes lipofílicas de los surfactantes y sus partes hidrofílicas. Todas estas interacciones, y el predominio de unas sobre otras van a determinar que tipo de emulsiones se van a formar.

En el caso planteado anteriormente se mantuvieron las mismas proporciones de TOFA y MEA, pero se aumentó la cantidad de agua, esto trae como consecuencia que aumenten las interacciones entre la parte hidrofílica del surfactante y el agua (fase polar).

El aumento de estas interacciones puede originar que se formen emulsiones del tipo O/W, o lo que sucedió específicamente, la formación de emulsiones múltiples.

Tabla N° 15. Resultados de Emulsiones de crudo Cerro Negro diluido en 50% de Diesel. Utilización de TOFA y MEA

N° de Muestra	Porcentaje de Agua (%)	Porcentaje de TOFA (%)	Porcentaje de MEA (%)	Tipo de Emulsión	Estabilidad (día)
1	5	5	0,126	W/O	7
2	10	5	0,126	W/O	7
3	20	5	0	W/O	1
4	20	5	0,126	O/W/O	-
5	20	5	0,253	O/W/O	-
6	20	5	0,444	O/W	-
7	30	5	0,126	O/W	-
8	30	5	0,094	O/W	-
9	30	5	0,061	O/W	-
10	30	5	0,024	O/W	-
11	30	5	0,012	O/W	-
12	30	5	0	W/O	1
13	30	10	0,012	O/W	-
14	30	10	0,0067	O/W	-
15	30	0	0,0067	W/O	1
16	30	0	0,0034	W/O	1
17	30	1	0,0066	O/W	-
18	30	0,5	0,0066	W/O	1
19	30	0,75	0,0066	O/W	-
20	30	0	0,0132	W/O	1
21	30	0,6	0,0066	W/O	1

En la Tabla N° 15, se evidencia claramente que con proporciones de agua del 20 y 30% es difícil conseguir emulsiones del tipo W/O con el sistema crudo /diesel / agua / TOFA / MEA evaluado, tal como se mencionó en párrafos anteriores. Esto se debe principalmente a que las sales o carboxilatos que se están generando, al reaccionar la TOFA y los surfactantes naturales con la MEA, son bastante hidrofílicos y cuando están en presencia de una alta fase acuosa, su tendencia será interactuar con las moléculas de agua y

promover la formación de emulsiones del tipo O/W. Esto se puede evitar si se usa la TOFA sin ionizar como aditivo surfactante (muestras 3 y 12) donde se observa que se forman emulsiones W/O, pero son muy inestables. Otra forma de generar emulsiones del tipo W/O fue emplear solo los surfactantes naturales y activarlos con MEA (muestras 15, 16, 20), pero igualmente son muy inestables.

Es importante destacar que para esta dilución en específico, en la que se pretende simular la viscosidad de un crudo liviano diluyendo con 50% de diesel el crudo Cerro Negro, se tuvieron muchas dificultades, y las emulsiones creadas en su mayoría fueron bastante inestables. Esto se puede atribuir en parte a que la viscosidad de la fase continua es bastante baja lo que permite que las gotas de aguas sedimenten y coalescan con mayor facilidad, y de igual modo esta baja viscosidad no permite que se aproveche a plenitud toda la energía de mezclado por lo que hay que recurrir a velocidades mayores para intentar incorporar la cantidad de agua deseada. A esto se le puede añadir que tal vez el surfactante no era el más adecuado y que tal vez con otro se conseguiría mayor estabilidad en la formación de tales emulsiones, pero la escogencia de otro surfactante podría alterar la química del crudo y no se estaría simulando a plenitud lo que sería la matriz química de éste. Pero estas dificultades para formar las emulsiones no se alejan mucho de lo que sucede en la realidad puesto que los crudos livianos por su composición química no suelen presentar problemas severos de emulsiones, y generalmente estas emulsiones pueden ser rotas por metodologías no muy complicadas que pueden ser del tipo físicas sin tener que llegar a la utilización de las químicas. El mayor problema con emulsiones se presenta para crudos medianos y pesados debido a sus características químicas y físicas que hacen de estas emulsiones sistemas mucho más estables.

IV.1.3 Estabilidad Dinámica.

Esta prueba fue aplicada a distintas emulsiones para evaluar la resistencia de las mismas a la coalescencia cuando son sometidas a recorridos por tuberías, bombas y válvulas. El equipo utilizado, el reómetro de coalescencia, tiene la limitante de que en él no

se pueden utilizar fluidos de viscosidad superior a 1000 cP. De igual modo, para utilizar este equipo es necesario preparar grandes volúmenes de emulsión lo que implica un consumo grande de tiempo. En base a lo antes mencionado, solo se realizaron las pruebas sobre tres emulsiones que fueron consideradas representativas.

A continuación en la Tabla N° 16, se observan las tres emulsiones a las cuales se les hizo la prueba de estabilidad dinámica en el reómetro de coalescencia.

Tabla N° 16. Emulsiones sometidas a la prueba de estabilidad dinámica.

Relación Crudo Diesel	Porcentaje de agua (%)	Observaciones
70:30	10	Disminución en el Dp
	20	Inversión de Fases en el pase 2
50:50	20	Ligero aumento en el Dp

Se puede observar que en la emulsión cuya fase continua está diluida en 30% de diesel y en la que se dispersó 20% de agua hubo una inversión de fases luego del segundo pase, esto quiere decir que el agua pasó a ser la fase continua y el crudo pasó a dispersarse en el agua. El fuerte cizallamiento producido por el equipo y los mecanismo que el mismo reproduce fueron los causantes de tal fenómeno. Para sustentar la tabla previa, a continuación se encuentran el Gráfico N° 16 y el Gráfico N° 17

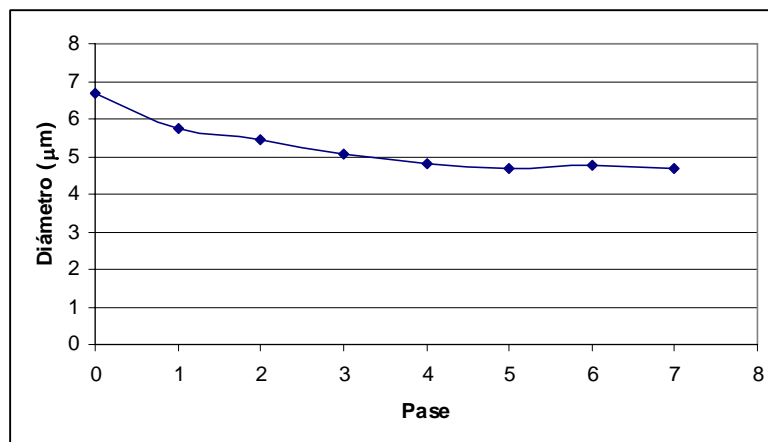


Gráfico N° 16. Estabilidad Dinámica de Emulsiones. Variación del Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel:70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM

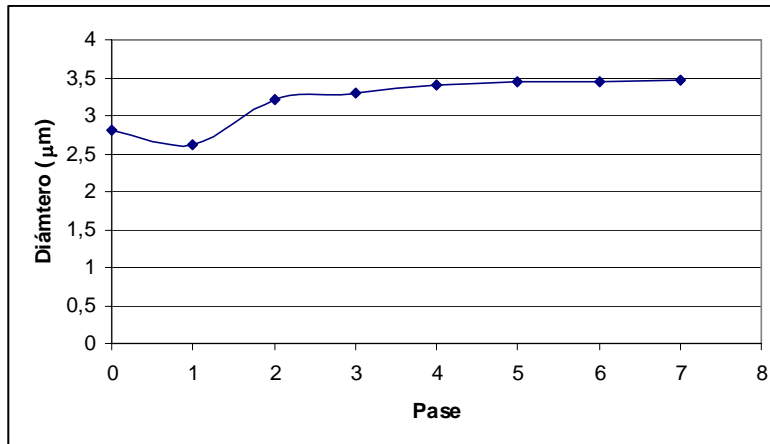


Gráfico N° 17. Estabilidad Dinámica de Emulsiones. Variación del Tamaño de Gota. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM

En el Gráfico N° 16, que corresponde a la emulsión señalada en los rótulos se puede ver una disminución en el diámetro promedio de gota a medida que se van haciendo los distintos pasos en el reómetro de coalescencia, en un principio el diámetro era de 6,7 μm y fue disminuyendo hasta ubicarse a partir del paso 5 en aproximadamente 4,7 μm. La disminución en el diámetro promedio indica que el cizallamiento ocasionado por el reómetro de coalescencia ocasionó la ruptura de las gotas hasta llevarlas a un estado de equilibrio que se sitúa en 4,7 μm. Una disminución en el diámetro promedio de gota traerá como consecuencia una emulsión más estable e igualmente un aumento en la viscosidad (aunque no significativo) de la emulsión en sí.

En el Gráfico N° 17, se ve un comportamiento un poco diferente al del Gráfico N° 16, primeramente con el paso 1 se observa una ligera disminución en el diámetro promedio de gota, para luego aumentar también de forma ligera hasta un aproximado de 3,45 μm luego del paso 5. Este ligero aumento quiere decir que el cizallamiento producido por el reómetro de coalescencia ocasiona que las gotas de agua de tal emulsión se acerquen y coalescan aumentando así el diámetro promedio de las mismas.

El mecanismo seguido para hacer estas pruebas de estabilidad dinámica es el mismo realizado para la certificación de Orimulsión[®], por lo tanto, la prueba en sí, contempla un sometimiento de la emulsión a condiciones bastante rigurosas. Las futuras pruebas en el laboratorio de levantamiento artificial no serán de tanto rigor y con el aumento o disminución en el diámetro promedio de gota de las emulsiones probadas se puede considerar que las emulsiones son dinámicamente estables.

IV.1.4 Variaciones del diámetro

En los gráficos siguientes se presentan las tendencias obtenidas en los diámetros de gota de las distintas emulsiones preparadas, específicamente las variaciones relacionadas a la variación del porcentaje de diesel utilizado para diluir el crudo Cerro Negro y las variaciones relacionadas a la variación del porcentaje de agua emulsionado.

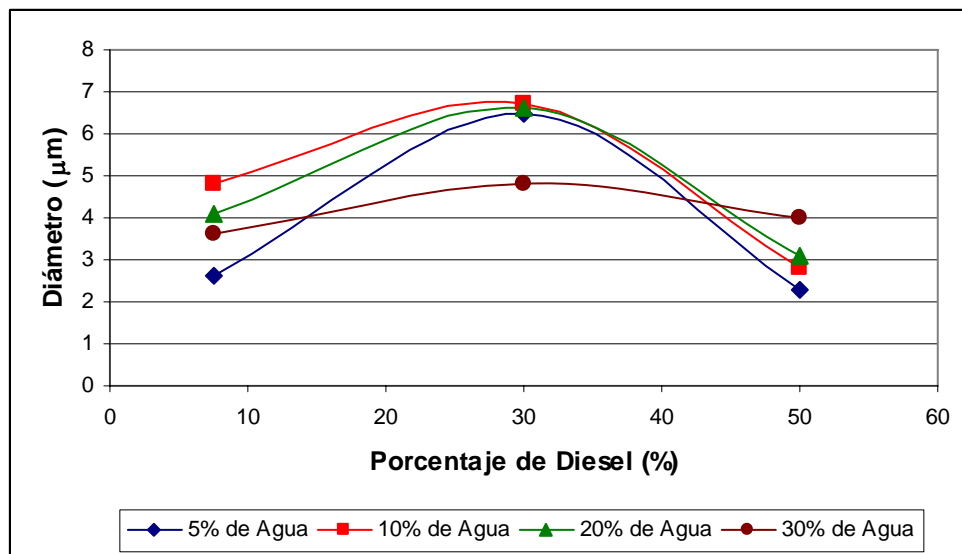


Gráfico N° 18. Variación del Diámetro de Gota con respecto al Porcentaje de Diesel presente en la fase continua.

En el Gráfico N° 18, se pueden observar cuatro curvas, una para cada porcentaje de agua emulsionado, que representan los distintos diámetros de gota obtenidos al variar el

porcentaje de diesel existente en la fase continua. Es importante destacar que este diesel fue utilizado para disminuir la viscosidad del crudo Cerro Negro y así poder simular viscosidades correspondientes a crudos pesados, medianos y livianos. Si se compran las cuatro curvas entre sí, no se va encontrar una relación específica, debido principalmente a que las características de formación de cada una de las emulsiones son muy distintas (velocidad del impulsor), pero sí se puede decir que cada una de las curvas presenta la misma tendencia. Cuando se tiene 7,5% de diesel en la fase continua se observa que los puntos correspondientes al diámetro de gota para cada una de las curvas se encuentran en un valor más bajo que cuando el porcentaje de diesel es de 30%, y luego se puede observar que para los cuatro porcentajes de agua, este diámetro de gota baja cuando la hay un 50% de diesel en la fase externa, que inclusive llega a ser el menor de los diámetros para todas las curvas a excepción de la curva que representa 30% de agua emulsionado.

La tendencia antes descrita se puede explicar fácilmente tomando en cuenta la concentración de surfactante existente en la fase continua. Para 7,5 y 30% de diesel se utilizaron únicamente como fuente de surfactantes los existentes en el crudo Cerro Negro. Cuando se diluye este crudo extra-pesado con 30% de diesel se producen dos efectos a favor del aumento de diámetro de gota, el primero de ellos se refiere a la disminución de la viscosidad de la fase externa, lo que permite que el desplazamiento de la fase interna sea mucho más fácil por el seno de la fase externa y por lo tanto al momento de formar la emulsión puede haber mayor tendencia a la coalescencia que provoca gotas más grandes, por otro lado, este aumento en la cantidad de diesel provoca una disminución en la concentración de surfactantes para emulsionar la misma cantidad de agua, ya que se necesita mayor cantidad de éstos para estabilizar gotas más pequeñas por aumentar el área interfacial.

Para el caso del diámetro de gota cuando existe 50% de diesel en la fase externa, la disminución en el tamaño de gota se atribuye a la utilización de TOFA como sustituto de los surfactantes naturales del crudo Cerro Negro y de la MEA como promotor de la formación de carboxilatos que poseen mayor actividad interfacial. La utilización de éstos,

permiten que aumente la concentración de surfactantes, por lo que es posible formar emulsiones con diámetros de gotas menores, puesto que se encuentra disponible suficiente cantidad de surfactante para estabilizarlas.

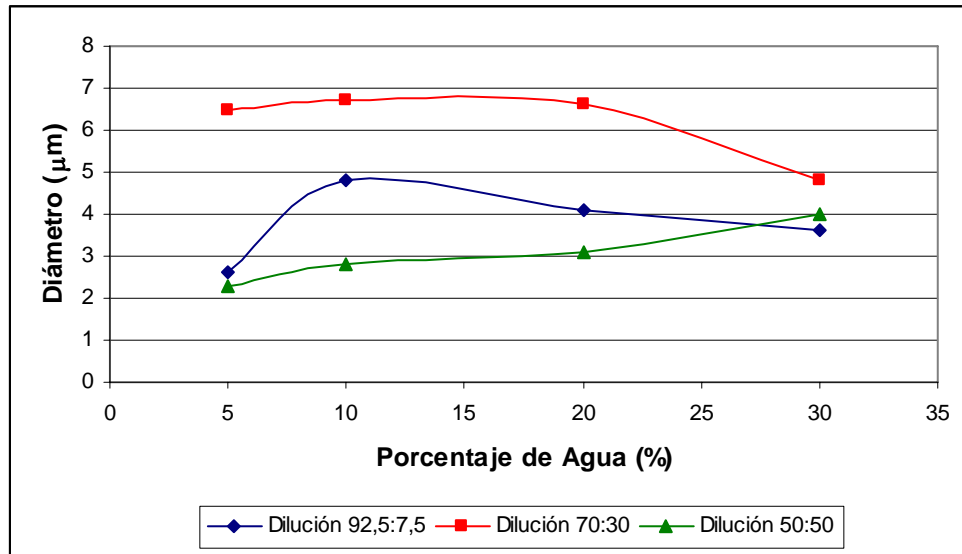


Gráfico N° 19. Variación del Diámetro de Gota con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado.

En el Gráfico N° 19, se observan como son las variaciones del diámetro con respecto al porcentaje de agua emulsionado. Se puede observar que las tres curvas poseen tendencias muy distintas, la falta de una tendencia mucho más clara radica en el hecho de que no solo está variando las condiciones de composición, sino que también se están variando las condiciones de mezclado al aumentar la velocidad del impulsor para así poder dispersar mayor cantidad de agua en el sistema. Nuevamente es importante destacar que el objetivo principal era poder dispersar la cantidad de agua especificada y que ésta se mantuviera emulsionada por un determinado período de tiempo, es decir, no había una búsqueda de un diámetro de gota o de otra propiedad en específico. Todos los diámetros se encuentran entre 2 y 7µm, lo que les confiere características de emulsiones a plenitud.

De igual modo en el Gráfico N° 19, se puede apreciar que la curva que representa la dilución con 30% de diesel se encuentra por encima de la curva que representa la dilución con 7,5% de diesel y de igual modo se puede observar que la curva que representa la dilución con 50% de diesel se encuentra por debajo de las otras dos. Esto sirve para afianzar lo referente al Gráfico N° 18 , es decir, los diámetros de gota cuando la fase externa posee 30% de diesel son mayores con respecto a los correspondientes cuando la fase externa posee 7,5% de diesel porque la viscosidad de la primera es mucho menor y porque hay una reducción considerable en la concentración de surfactantes naturales. Para el caso de 50% de diesel en la fase continua se adicionaron TOFA y MEA, lo que permitió aumentar la concentración de surfactantes y al este hacerse mayor es posible obtener gotas más pequeñas.¹⁴

IV.1.5 Variaciones en la Viscosidad Aparente

En los gráficos siguientes se presentan las tendencias obtenidas en la viscosidad aparente en las emulsiones preparadas, específicamente las relacionadas a la variación del porcentaje de diesel utilizado para diluir el crudo Cerro Negro y las relacionadas a la variación del porcentaje de agua emulsionado.

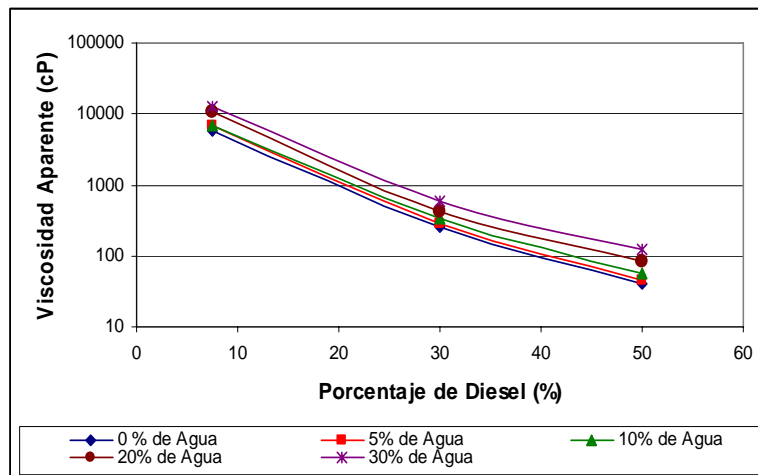


Gráfico N° 20. Variación de la Viscosidad Aparente a 20 s^{-1} y 50°C con respecto al porcentaje de Diesel presente en la fase continua.

En el Gráfico N° 20 se pueden observar cinco curvas, se encuentra la curva correspondiente a la viscosidad de las distintas fases externas y las cuatro restantes corresponden cada una a un porcentaje de agua emulsionado distinto, 5, 10, 20 y 30%. La tendencia para las cuatro curvas es de disminuir la viscosidad aparente a medida que aumenta el porcentaje de diesel presente en la fase externa.

Con este gráfico se puede observar que la viscosidad de la fase externa es una de las propiedades más influyentes en la viscosidad de las emulsiones preparadas, es por ello que todas las curvas que representan las distintas cantidades de agua emulsionadas se encuentran por encima de la curva de 0% de agua que representa como tal la viscosidad de la fase continua.

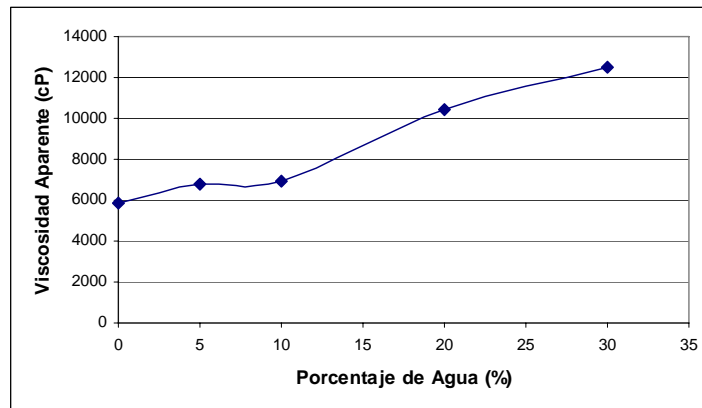


Gráfico N° 21. Variación de la Viscosidad Aparente a $20s^{-1}$ y $50\text{ }^{\circ}C$ con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado. Proporción Crudo / Diesel 92,5:7,5.

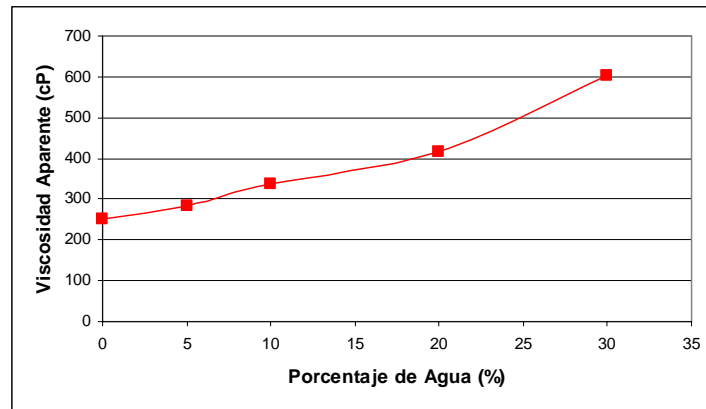


Gráfico N° 22. Variación de la Viscosidad Aparente a $20s^{-1}$ y $50\text{ }^{\circ}C$ con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado. Proporción Crudo / Diesel 70:30

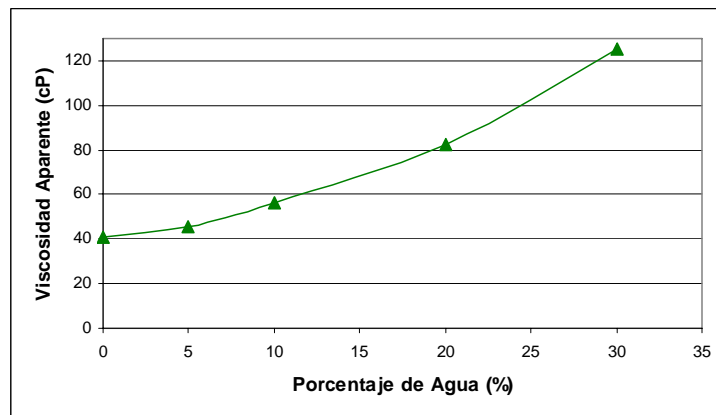


Gráfico N° 23. Variación de la Viscosidad Aparente a $20s^{-1}$ y $50\text{ }^{\circ}C$ con respecto al Porcentaje de Agua Emulsionado. Proporción Crudo / Diesel 50:50

En el Gráfico N° 21, en el Gráfico N° 22 y en el Gráfico N° 23 se puede apreciar la variación de la viscosidad aparente con respecto al porcentaje de agua emulsionado, para cada una de las diluciones hechas con diesel. Como se puede notar en las tres curvas, a medida que aumenta el porcentaje de agua aumenta también el valor de la viscosidad aparente y esto se debe a que al haber mayor cantidad de gotas, estas tienen una mayor interacción entre sí y por lo tanto la viscosidad del sistema aumenta. Pero es importante destacar que también juegan un papel muy importante el tamaño de gota promedio que se está formando y la distribución de tamaños de gota. Para las emulsiones preparadas los

diámetros de gotas oscilan entre 2 y 7 μm , pero esta pequeña diferencia no va a influir significativamente en las variaciones presente en el valor de viscosidad, para este caso va a ser más importante el valor de viscosidad de la fase externa y el contenido de fase interna que se encuentra emulsionado.

Para el caso de la dilución con 7,5% de diesel se puede observar que la viscosidad aumenta de 5841 cP hasta 12490 cP con 30% de agua emulsionada, es decir, se produce un aumento de viscosidad del 113,8%, lo cual constituye un aumento bastante significativo en el valor de viscosidad. Para el caso de la dilución con 30% de diesel la viscosidad aumente de 251 cP a 415,7 con 30% de agua emulsionada, lo que significa un aumento del 65,6% en el valor de viscosidad. Por último, para el caso de la dilución con 50% de diesel, la viscosidad aumenta de 41,1cP hasta 125,3cP para el caso de 30% de agua emulsionada, lo que representa un aumento del 204,9% en el valor de la viscosidad.

Este aumento inminente de la viscosidad producido por la formación de una emulsión es el principal problema al utilizar un sistema de Bombeo Electrosumergible (BES) donde exista formación de emulsiones, puesto que no existe ninguna correlación que indique a cuanto va a aumentar la viscosidad del fluido (emulsión) dependiendo de la cantidad de agua presente. Esto es así porque es importante destacar que no todo el agua asociada al crudo esta emulsionada y por otro lado existen otros factores que influyen en el valor de esta viscosidad como lo son el tamaño de gota y la distribución del tamaño de gota, así como también influye la composición química del crudo ya que un crudo rico en surfactantes naturales va a tener la tendencia a formar emulsiones mientras que un crudo que no posea surfactantes en gran proporción no va a tener tanta tendencia a formar estas emulsiones.

IV.2 LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

IV.2.1 Revisión de Facilidades Existentes

En PDVSA – Intevep, específicamente en el edificio Norte 6, se encuentran las instalaciones correspondientes al Laboratorio de Levantamiento Artificial. Este laboratorio está dotado con modernas instalaciones a escala piloto en el que se realizan diversas pruebas con el fin de evaluar los sistemas de bombeo electrosumergible (BES), bombeo de cavidades progresivas (BCP) y bombeo mecánico (BM).

En este laboratorio existe un circuito cerrado del sistema BES en el que actualmente se realizan pruebas con flujo bifásico (agua – aire) y también se realizan pruebas con flujo viscoso (aceite Purolub 320); estas pruebas se realizan con el fin de caracterizar hidráulicamente la bomba BES cuando trabaja bajo las condiciones estudiadas con el fin de conocer el desempeño real de la misma.

A continuación se hace una descripción del proceso del actual circuito de pruebas de BES existente en el laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep, y luego de la misma se listan los principales equipos que conforman este circuito con sus características más resaltantes.

IV.2.1.1 Descripción del proceso del circuito de BES del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.

El Tanque de Almacenamiento T-01 se encuentra lleno de agua o aceite sintético (Purolub 320), dependiendo de la condición a estudiar, el cual llega a dicho tanque mediante el conjunto de tuberías y válvulas que conforman el sistema de llenado del mismo. Este tanque de almacenamiento se encuentra a presión y temperatura atmosférica y posee un sensor diferencial de presión que se encuentra conectado a un indicador de nivel. Igualmente el Tanque de Mezclado T-02 se utiliza para el almacenamiento de los fluidos de trabajo.

El fluido de trabajo deja el Tanque de Almacenamiento T-01 o el Tanque de Mezclado T-02 y es bombeado por la bomba centrífuga B-01 o la B-02, para así dirigirse al

fondo de la bomba electrosumergible. Adicionalmente el fluido puede ser bombeado a través de una bomba de cavidades progresivas cuando las pruebas requieran alta presión en la entrada de la bomba BES. Igualmente a la BES puede entrar una corriente de aire para así simular diferentes condiciones de flujo bifásico. Existen unos transmisores de presión y temperatura antes de la entrada de la bomba los cuales se encuentran conectados a unos indicadores con el objeto de registrar estas variables.

Adicionalmente la bomba esta instrumentada internamente, tiene 15 sensores de presión y 5 sensores de temperatura en diferentes etapas de la misma. Los sensores de presión y temperatura en la primera etapa están asociados a un sistema de control de que permite regular estas variables en el sistema BES. Por otro lado, en el espacio anular entre la BES y el revestidor, donde la bomba esta inmersa, existe un sensor diferencial de presión el cual se encuentra asociado a un indicador de nivel para así poder tener información de cual es el nivel de fluido en dicho anular.

La BES aumenta la presión del fluido, es decir, permite que el fluido sea “levantado”. A la salida de la bomba, también se encuentran sensores de temperatura y presión. Es importante destacar que en la BES no toda la energía cinética se transforma en energía potencial, sino que también una parte de esta energía se transforma en energía calórica por lo que el fluido tiende a calentarse.

El fluido llega entonces al Separador Bifásico, donde es posible separar el agua y el aire, el primero sale por el fondo del separador, mientras que el aire es venteadado a la atmósfera. El aceite es bombeado entonces por la bomba B-04 hasta el Intercambiador de Calor, el cual es de tubos y carcasa y cuya configuración es co-corriente, en él se reduce la temperatura del fluido mediante agua de enfriamiento la cual circula por los tubos de dicho intercambiador. Una vez el aceite sale del intercambiador se dirige nuevamente al tanque de almacenamiento para así cerrar el circuito. En la Figura N° 38, se muestra el diagrama de tuberías e instrumentación (DTI) del actual circuito de pruebas.

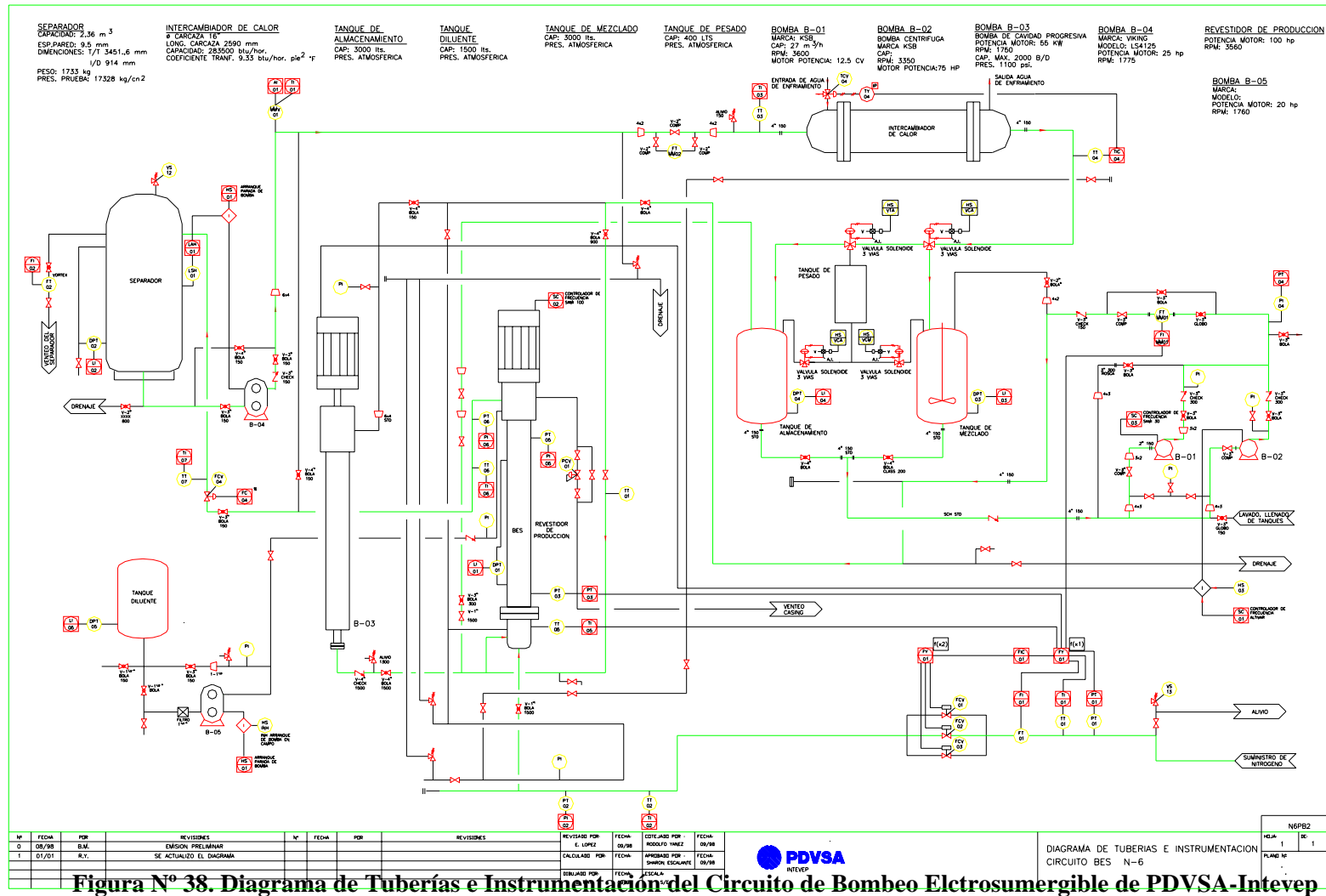


Figura N° 38. Diagrama de Tuberías e Instrumentación del Circuito de Bombeo Elctrosomergible de PDVSA-Intevep

IV.2.1.2 Lista de Equipos

A continuación se presentan en tres tablas la lista de los equipos más importantes presentes en el circuito experimental previamente descrito.

Tabla N° 17. Lista de Tanques

Identificación	Servicio	Fluido	Capacidad (l)	Dimensiones	
				Diámetro (m)	Altura (m)
T-01	Tanque de Almacenamiento	Aceite o agua	3000	1,6	1,9
T-02	Tanque de Mezclado	Aceite o agua	3000	1,6	1,9

En la Tabla N° 17 se encuentran descritos los tanques que forman parte del circuito BES. Tanto el tanque T-01, como el Tanque T-02 se pueden utilizar para el almacenamiento del fluido de trabajo, cada uno posee una capacidad de 3000 litros, y poseen igual diámetro e igual altura, con lo que se obtiene una capacidad actual de almacenamiento de 6000 litros.

Tabla N° 18. Lista de Recipientes

Identificación	Tipo	Fabricante	Servicio	Fluidos	Longitud (m)	Diámetro (m)
RE-01	Intercambiador de Calor	FRAPCA	Enfriamiento de fluidos del proceso	Agua / Aceite	0,2	0,41
RE-02	Separador Bifásico	IMOSA	Separación a la descarga de la BES	Crudo / Aire	-	-

En la Tabla N° 18, se encuentran los equipos-recipientes que forman parte del proceso. En primer lugar se tiene un intercambiador de calor cuyo fabricante es la compañía FRAPCA. Como se mencionó en la descripción del proceso, este intercambiador es de tubos y carcasa y de configuración co-corriente, su función primordial es enfriar el

líquido proveniente del separador bifásico el cual se ha calentado en la bomba electrosumergible. Este equipo utiliza agua de enfriamiento como líquido para reducir la temperatura.

Igualmente en la Tabla N° 18, se encuentra la descripción del separador bifásico, que luego de la BES constituye el equipo más importante. Como se mencionó anteriormente, en este circuito se realizan pruebas de flujo bifásico, es decir, de un flujo constituido por agua y aire, una vez que es evaluado el efecto de este flujo en el desempeño de la BES, se hace necesario separarlo en el RE-02. Por el fondo de éste sale el líquido para dirigirse al intercambiador de calor RE-01 mientras que el aire es venteado a la atmósfera por el tope.

En la Tabla N° 19 y en la Tabla N° 20, se encuentran listadas las bombas que forman parte del circuito BES. Primeramente se encuentran dos bombas centrífugas, la B-01 y la B-02, esta última de 4 etapas, ambas fabricadas por la compañía KSB, siendo el caudal máximo y la potencia de la primera de 2000 bpd y 12 HP respectivamente y para la segunda de la segunda de 6000 bpd y 75 HP respectivamente. Son más altos los valores de la bomba B-02 por ser esta de 4 etapas.

También se encuentra listada la bomba de cavidades progresivas B-03, esta bomba de desplazamiento positivo se utiliza en el circuito BES para poder suministrar mayor presión al fluido que entra a la bomba electrosumergible, esta bomba ha sido manufacturada por la compañía RODEMIP y permite manejar un caudal máximo de 1885 bpd con una presión de descarga de hasta 800 psi y su potencia es de 75 HP.

Por último se encuentra la bomba B-04, la cual de igual modo es de desplazamiento positivo, esta bomba fabricada por VIKING es una bomba de engranajes y tiene una potencia nominal de 25 HP. La misma permite darle la presión suficiente al fluido para llevarlo desde el separador bifásico, a través del intercambiador de calor y hasta el tanque de almacenamiento T-01.

Tabla N° 19. Lista de Bombas.

Identificación	Tipo	Fabricante	Modelo	Servicio
B-01	Centrífuga	KSB	40/200/152	Suministro de Aceite
B-02	Centrífuga multietapa (4)	KSB	MOVI 65	Suministro de Aceite
B-03	Cavidades Progresivas	RODEMIP	300TP800	Suministro de Aceite
B-04	Engranajes	VIKING	LS4125	Descarga del Separador

Tabla N° 20. Lista de Bombas (Continuación)

Identificación	Caudal Máximo (bpd)	Potencia (HP)	Voltaje (V)	Velocidad (RPM)	Presión Máxima (Psig)
B-01	2000	12	240/440	3600	150
B-02	6000	75	230/260	3550	150
B-03	1885	75	480	500	1126
B-04	6000	25	230/460	-	200

IV.2.1.3 Descripción de la Bomba Electrosumergible (BES)

La bomba centrífuga que se encuentra en este circuito de pruebas ha sido manufacturada por CENTRILIFT y su modelo es el GC2900, esta bomba electrosumergible posee 35 etapas y la altura dinámica que se obtiene por etapa según datos del fabricante es de 57 pies. La potencia y el voltaje del motor que acciona la bomba es 100 HP y 400 V respectivamente.

Es importante señalar que esta bomba electrosumergible posee una configuración de motor atípica, puesto que éste se encuentra en la parte superior de la bomba, a diferencia de aplicaciones de campo donde el motor siempre es colocado por debajo de la bomba. De igual modo es importante destacar que el sistema BES de este circuito está dotado de un variador de frecuencia, que como se mencionó permite manejar la frecuencia del motor y

por lo tanto es posible cambiar la velocidad de la bomba y por lo tanto cambiar el caudal del fluido.

Los equipos que actualmente conforman el circuito de pruebas con el sistema BES en el laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep y la configuración de los mismo, no permite la formación de emulsiones para los fines previstos, por lo tanto se deben diseñar nuevas facilidades experimentales que permitan formar las emulsiones antes dichas.

IV.2.2 Nuevas Facilidades Experimentales

Como se ha explicado anteriormente, este trabajo esta motivado por la apertura de una nueva línea de investigación en donde sea posible evaluar el efecto de emulsiones de agua en crudo en el desempeño del bombeo electrosumergible. Se trabajará específicamente con el caso en que la emulsión llega ya formada a la entrada de la bomba. Para tales fines a nivel de laboratorio se generaron las bases de diseño para implantar un proceso continuo y con los datos generados a continuación se presenta el esquema a seguir para la preparación de dichas emulsiones y su integración al actual circuito de pruebas existente en el laboratorio de levantamiento artificial. El diseño de estas nuevas facilidades tomó en consideración producir a lo sumo 9000 l de emulsión, cantidad con la cual es posible realizar las pruebas necesarias para la evaluación del sistema BES. Primero se muestra un diagrama de flujo de procesos (DFP), en el que se especifica el esquema de preparación de emulsiones y luego se presenta el balance de masa asociado al dimensionamiento del mezclador a utilizar para la preparación de emulsiones.

IV.2.2.1 Diagrama de Flujo de Proceso (DFP) y Descripción del Proceso

En la

Figura N° 39, se presenta el diagrama de flujo de proceso de lo que serían las nuevas instalaciones del laboratorio de levantamiento artificial de PDVSA-Intevep

IV.2.2.1.1 Dilución del Crudo Cerro Negro

El crudo Cerro Negro, es un crudo extra pesado de 8° API y de unos 200000 cP a 25 °C lo que lo convierte en un crudo altamente viscoso. Dicho crudo se encuentra almacenado en barriles los cuales pueden ser recubiertos por mantas de calentamiento para aumentar la temperatura y por lo tanto disminuir la viscosidad para que así pueda fluir. Se necesitarán unas 15 mantas y las conexiones necesarias para lograr la producción deseada de 9000 litros de emulsión. Una vez que el crudo abandona el barril es bombeado por la bomba B-102 hasta llegar al tanque de calentamiento de crudo T-104, en este tanque el crudo se calentará hasta llegar a la temperatura de 50 °C. Este tanque está provisto de un sensor de temperatura, TT-01 el cual está ligado a un sistema de control para regular así la temperatura dentro del recipiente. Dentro de este recipiente se encuentra un serpentín por el cual circula vapor sobrecalentado de baja presión, mediante la manipulación del flujo del mismo se controla la temperatura en el recipiente.

En el tanque T-103 se encuentra almacenado Diesel, el mismo es bombeado por la bomba B-103 para unirse en línea al flujo de crudo proveniente del tanque T-104, es importante destacar que debe haber una proporcionalidad definida entre el crudo y el diesel para así mantener la misma viscosidad obtenida en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción, por ello es necesario implementar una estrategia de control de relación para asegurar que se alimenten las proporciones previamente definidas. Dicha estrategia de control se esquematiza en la Figura N° 40.

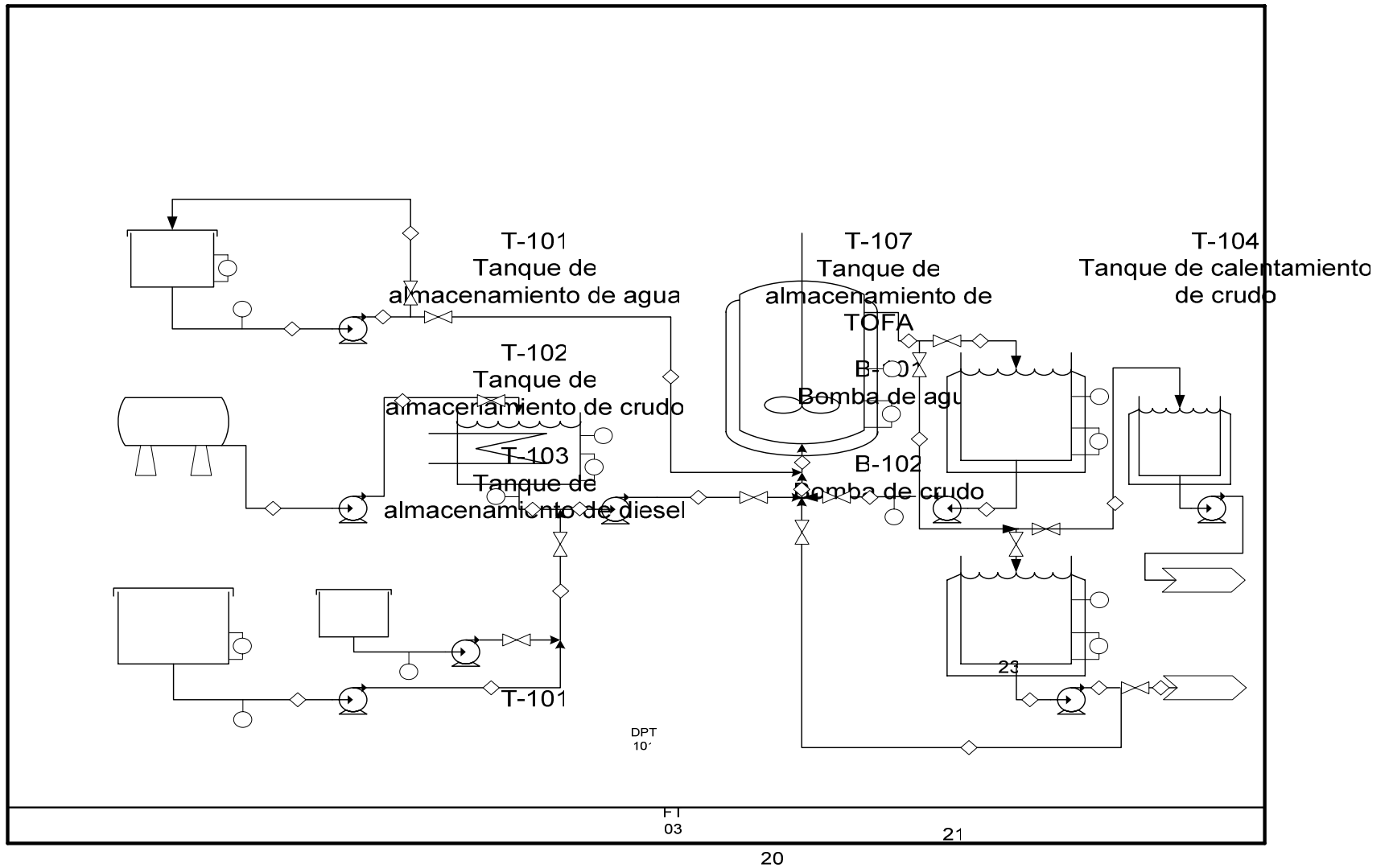


Figura N° 39. Diagrama de Flujo de Procesos de Nuevas Instalaciones en el Laboratorio de Levantamiento Artificial B-101

El flujo de crudo que sale de T-104 es considerado como flujo salvaje, es decir, es el flujo sobre el cual no se va a tener control, éste es medido por el sensor transmisor FT-02, ese valor es multiplicado en la estación de cálculo FY-01 por la relación R y así se constituye el Set Point para el controlador FC-01. Por otra parte, el flujo de diesel es medido por el sensor transmisor FT-01, dicho valor es comparado con el valor del Set Point y de acuerdo al resultado es manipulado el motor de la bomba B-103 para así regular el flujo de diesel y asegurar que se cumpla la relación entre el flujo de crudo y el flujo de diesel para obtener la dilución deseada.

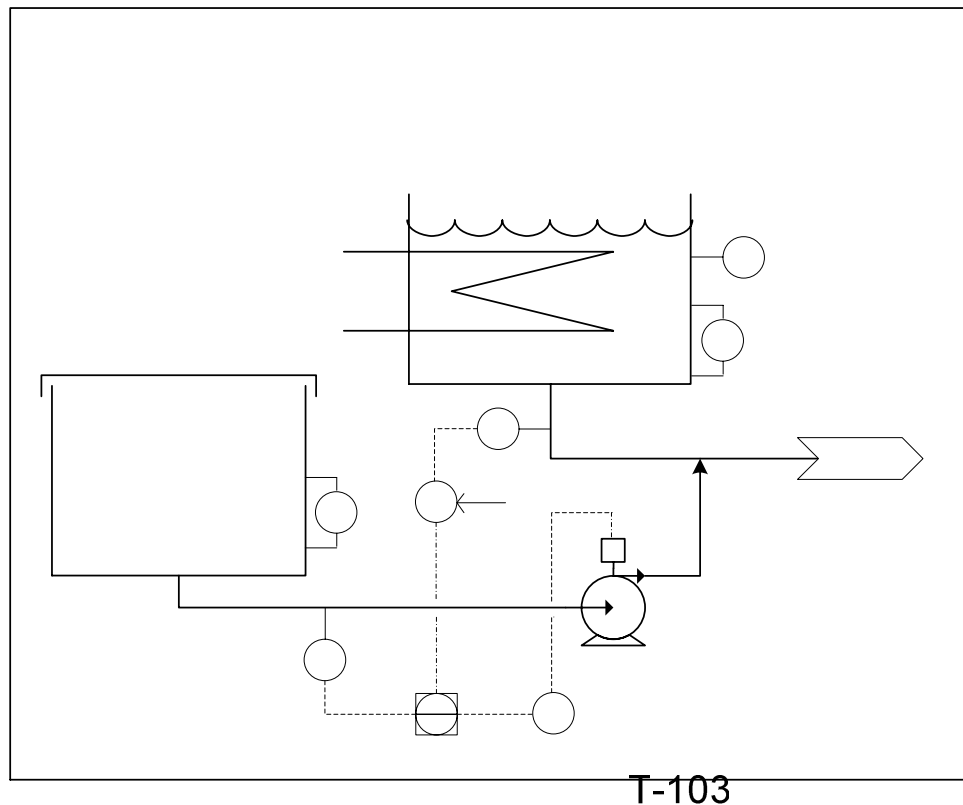


Figura N° 40. Estrategia de Control de Relación Para la Dilución de Crudo Cerro Negro y el almacenamiento de diesel

Adicionalmente se puede presentar el caso en el que sea necesaria la adición de TOFA a la fase continua, el almacenamiento de esta sustancia se hace mediante el tanque T-107. Solo de ser necesario desde el tanque mencionado anteriormente la TOFA es bombeada por la bomba B-107 hasta unirse en línea con el diesel proveniente del tanque de

almacenamiento T-103. La proporción que se adiciona de TOFA tiene que hacerse de forma muy exacta por lo que se recomienda la implementación de un sistema de control de relación parecida a la narrada anteriormente.

Una vez que se mezclan en línea el crudo y el diesel estos pasan al mezclador dinámico MD-101, en el cual se realiza en sí la operación de homogeneización entre estos compuestos, una vez abandonado este equipo, el crudo diluido se almacena en el tanque T-105. Cabe destacar que el mezclador dinámico MD-101 esta dotado con una chaqueta de calentamiento por la que circula vapor de baja presión cuyo flujo al ser manipulado permite controlar la temperatura en este recipiente de mezclado, la temperatura a la que se realiza la homogeneización es de 50 °C. De igual modo, el tanque T-105 posee un sensor de temperatura el cual está asociado a un sistema de control que permite mantener dicha temperatura en 50 °C, mediante la manipulación del vapor de baja presión que entra a la chaqueta de calentamiento de dicho tanque.

Todos los tanques involucrados en este proceso poseen sensores diferenciales de presión para así poder tener un indicativo del nivel de cada uno de ellos.

IV.2.2.1.2 Formación de Emulsiones

Para formar la emulsión, el crudo diluido que se encuentra almacenado a 50°C en el tanque T-105 (desplazado por la bomba B-105), y el correspondiente flujo de agua proveniente del tanque T-101 (bombeado por la bomba B-101) deben ser bombeados mezclador dinámico MD-101.

Es importante destacar que para el caso en el que se utilicen MEA Y TOFA como sustitutos de los surfactantes naturales del crudo, la adición de MEA se realizará manualmente, añadiendo la cantidad especificada en el tanque de almacenamiento T-101 y utilizando previamente el reciclo del mismo para lograr una mezcla homogénea.

Las emulsiones aquí formadas tienen un contenido específico tanto de fase continua como de fase dispersa, por lo que se hace indispensable la implementación de un sistema de control que permita que estas proporciones se mantengan invariables durante el tiempo. Para ello se seleccionó aplicar una estrategia de control de relación parecida a la explicada en el apartado IV.2.2.1.1, la Figura N° 41 muestra esquematizada dicha estrategia de control.

El flujo proveniente del tanque T-105, es decir, el flujo de crudo diluido que constituye la fase continua es considerado como flujo salvaje, mediante el sensor transmisor FT-02 se mide dicha variable, la cual llega a la estación de cálculo FY-02 donde se multiplica por la razón R, que viene a ser la relación entre la fase externa y la interna, el resultado de este cálculo sirve como Set Point para el controlador FC-02. Por otro lado, el flujo de agua es medido por el sensor transmisor FT-04, esta información llega al controlador y es comparada con el valor del Set Point, el cual va a permitir la manipulación del flujo de agua mediante la variación de la velocidad del motor de la bomba B-101. Así es posible controlar el flujo de agua que entra al mezclador TM-101 y por lo tanto se puede garantizar que la composición de la emulsión sea la deseada.

Una vez que la emulsión abandona el tanque de mezclado TM-101 se dirige al tanque de almacenamiento de emulsiones T-106, en donde la misma permanece a una temperatura de 50 °C. Si no se han conseguido las condiciones deseadas el flujo se dirige al tanque T-108 el cual es el tanque de desechos.

Todos los tanques involucrados en el proceso de formación de emulsiones poseen sensores diferenciales de presión para así poder tener un indicativo del nivel de cada uno de estos recipientes.

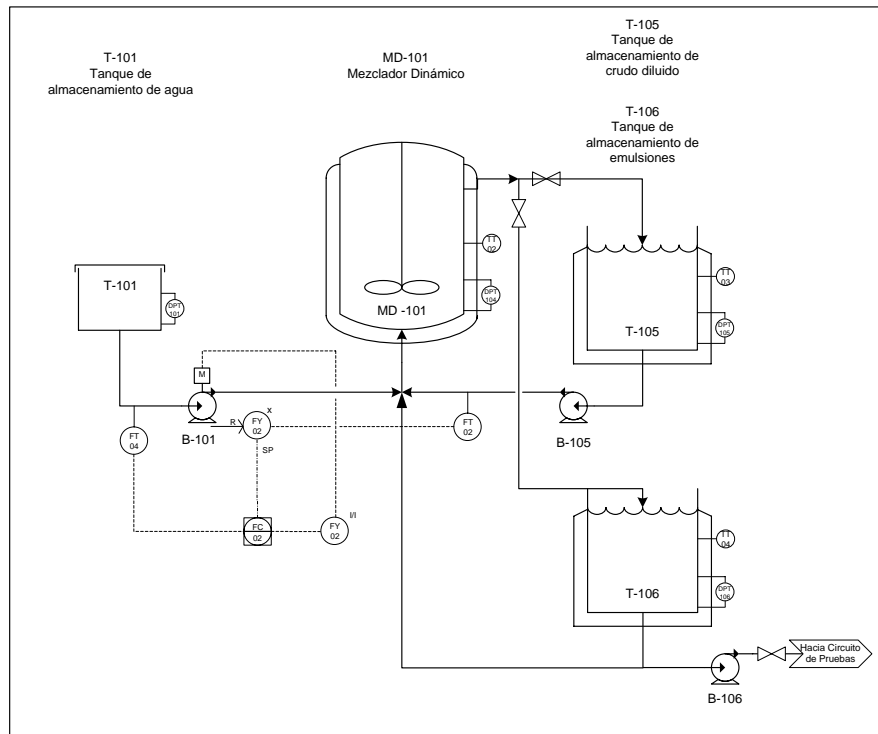


Figura N° 41. Estrategia de Control de Relación Para la Formación de Emulsiones de Agua en Crudo

IV.2.2.2 Lista de Equipos

A continuación se presentan dos tablas con algunas especificaciones sencillas de los equipos a ser utilizados en las nuevas facilidades experimentales.

En la Tabla N° 21, se muestran las dimensiones para los nuevos tanques, es importante señalar que los cálculos de las cantidades mínimas a almacenar están hechos en base a una producción de 9000 l de emulsión, pero producidos a intervalos de 3000 l. Primeramente se encuentra el tanque T-101 que será utilizado para el almacenamiento del agua a temperatura ambiente que constituirá la fase interna de las emulsiones. Se requerirá una capacidad mínima de almacenamiento de 2700 l y el tanque escogido tiene una capacidad de 3785 l. Estos tanques fueron seleccionados basados en tamaños estándar que cumplen con la normativa API.

El tanque T-103 será utilizado para el almacenamiento del diesel, se calcula que para producir 9000 l de emulsión se necesitará como máximo 4275 l de diesel, por lo que se seleccionó un tanque cuya capacidad de almacenamiento es de 7570 l. Igualmente se almacenará el diesel a temperatura ambiente.

Tabla N° 21. Lista de Nuevos Tanques ²⁵

Identificación	Uso	Capacidad mínima de almacenamiento (l)	Capacidad nominal (l)	Diámetro (plg)	Longitud (pies)	Grosor (plg)
T-101	Almacenamiento de Agua	2700	3785	64	10,67	3/16
T-103	Almacenamiento de Diesel	4275	7570	64	12	3/16
T-104	Calentamiento de Crudo	2640	3785	64	10,67	3/16
T-105	Almacenamiento de Crudo Diluido	6300	7570	64	10,67	3/16
T-106	Almacenamiento de Emulsiones	9000	11355	64	18	3/16
T-107	Almacenamiento de TOFA	450	1060	42	4	3/16
T-108	Almacenamiento de desechos	3000	3785	64	10,67	3/16

El tanque T-102 es en realidad un conjunto de 15 barriles que son rodeados con mantas calentadoras para proveer el calor necesario para que el crudo comience a fluir y pueda ser bombeado por la bomba B-102 hasta el tanque de calentamiento T-104

Luego se encuentra el tanque T-104, el cual se utilizará para calentar el crudo que proviene del tanque T-102, este tanque estará provisto de un serpentín interno por el

circulará vapor a baja presión para aumentar la temperatura del crudo hasta 50 °C. Se calcula que para producir 3000 l de emulsión se necesitan como máximo 2640 l de crudo por lo que se seleccionó un tanque cuya capacidad máxima de almacenamiento es de 3785 l.

Luego se encuentra el tanque T-105, el cual tendrá la función de almacenar el crudo diluido con diesel y el cual servirá como fuente de alimentación al mezclador para constituir la fase continua de la emulsión. Para preparar 9000 l de emulsión se necesitará como máximo 6300 l de este crudo diluido con diesel, por lo que se seleccionó un tanque cuya máxima capacidad es de 7570 l. este tanque estará provisto de una chaqueta de calentamiento por la que circulará vapor a baja presión la cual permitirá mantener la temperatura del fluido en 50 °C que es la temperatura a la que serán preparadas las emulsiones.

También se encuentra el tanque T-106, el cual tendrá como función el almacenamiento de las emulsiones ya formadas. Se desea preparar a lo sumo 9000 l de emulsión, puesto que este será la máxima cantidad de fluido disponible para hacer las pruebas con el sistema BES, en función de esto se seleccionó un tanque con capacidad de 11355 l. De igual forma este tanque estará provisto de una chaqueta de calentamiento por la que circulará vapor a baja presión para poder mantener la temperatura de almacenamiento del fluido en 50 °C. De igual modo este tanque poseerá una boca de visita con la que podrán ser tomadas muestras para su posterior análisis

Igualmente se encuentra en tanque T-107, el cual será usado para el almacenamiento de TOFA. De ser necesario su uso, para producir 9000 l se necesitaría una capacidad mínima de almacenamiento de 450 l ya que esta sería la máxima proporción en la que se utilizaría este surfactante, por lo tanto el tanque seleccionado posee una capacidad de 1060 l.

Por último se encuentra el tanque T-108 el cual cumplirá con la función de almacenamiento de desechos provenientes del mezclador dinámico MD-101, se estima que

este deberá un tener una capacidad mínima de 3000 l, el tanque seleccionado con los respectivos criterios de seguridad es de 3785 l.

Tabla N° 22. Lista de nuevas Bombas

Identificación	Uso	Máxima Viscosidad a manejar (cP)	Tipo de Bomba
B-101	Bombeo de Agua	1	Centrífuga
B-102	Bombeo de Crudo	200000	Desplazamiento Positivo
B-103	Bombeo de Diesel	4,1	Centrífuga
B-104	Bombeo de Crudo	31200	Desplazamiento Positivo
B-105	Bombeo de Crudo Diluido	6000	Desplazamiento Positivo
B-106	Bombeo de Emulsiones	14000	Desplazamiento Positivo
B-107	Bombeo de TOFA	30	Centrífuga
B-108	Bombeo de desechos	14000	Desplazamiento Positivo

En la Tabla N° 22, se presenta una lista con el tipo de bombas que deben ser utilizadas para el proceso de preparación de emulsiones. Se observa que las bombas podrían ser centrífugas o de desplazamiento positivo y el criterio seleccionado para la utilización de una u otra se basa en la viscosidad de los fluidos a manejar. Los fluidos menos viscosos pueden ser manejados por bombas centrífugas, mientras que los fluidos más viscosos deberían ser manejados por bombas de desplazamiento positivo.

IV.2.2.3 Dimensionamiento del Mezclador Dinámico MD-101

Siguiendo el procedimiento detallado en el capítulo de metodología en este apartado se muestran los resultados referentes al dimensionamiento del mezclador dinámico MD-101, que constituye el equipo mas importante de las nuevas facilidades experimentales.

IV.2.2.3.1 Tasa de Corte

Para determinar el régimen de flujo se hace necesario conocer el número de Reynolds, pero para conocer este valor se hace indispensable calcular el valor de la

viscosidad de la emulsión que se está produciendo; las emulsiones son fluidos pseudoplásticos, por lo que su valor de viscosidad aparente va a depender de la tasa de corte a la que se esté produciendo dicha emulsión. A su vez el cálculo de la tasa de corte va a depender del tipo de impulsor que se esté usando.

Tabla N° 23. Tasas de Corte para las distintas Emulsiones

Relación Crudo /Diesel	Porcentaje de Agua (%)	Tipo de Impulsor	Velocidad (RPM)	Tasa de Corte, G (1/s)
92,5:7,5	5	Rushton de 6 aspas	1000	200
	10		1000	200
	20		2500	500
	30		3000	600
70:30	5	Rotor/estator:	2000	1313,2
	10	T.K. Homo	2000	1313,2
	20	Mixer Mark II,	4000	2626,5
	30	Vacuum Type	5000	3283,1
50:50	5	Rotor/estator:	5500	3611,4
	10	T.K. Homo	6500	4268,0
	20	Mixer Mark II,	7500	4924,7
	30	Vacuum Type	8500	5581,3

En la Tabla N° 23, se muestran los valores de las tasas de corte correspondientes a la preparación de cada una de las emulsiones. Para la relación crudo/diesel de 92,5:7,5 se utilizó un impulsor tipo Rushton, por lo que su tasa de corte se calculó utilizando la ecuación 27. Para el caso de las otras relaciones crudo/diesel se utilizó un impulsor tipo rotor/estator, por lo tanto se utilizó la ecuación 28 para el cálculo de las respectivas tasas de corte. Se observó que al aumentar la cantidad de diesel o de agua a dispersar se requiere una mayor tasa de corte para poder dispersar toda el agua y obtener así una emulsión estable, esto se debe a que las condiciones antes mencionadas son adversas para la formación de emulsiones.

IV.2.2.3.2 Viscosidad Aparente

Como se mencionó anteriormente para un fluido pseudoplástico la viscosidad aparente varía en función de la tasa de corte y por eso con el aumento de la velocidad

periférica del impulsor la viscosidad aparente se reduce. Este comportamiento hace difícil la estimación de dicha viscosidad para el cálculo del número de Reynolds y la potencia hidráulica del impulsor.²¹

Tabla N° 24. Viscosidad aparente a 50°C

Relación Crudo /Diesel	Porcentaje de Agua (%)	K	n	Tasa de corte (1/s)	Viscosidad Aparente (cP)
92,5:7,5	5	7,896	0,948	200	5991,0
	10	8,841	0,917	200	5704,4
	20	14,568	0,890	500	7349,1
	30	19,290	0,788	600	4957,5
70:30	5	0,2871	0,996	1313,2	279,8
	10	0,3423	0,994	1313,2	326,7
	20	0,4473	0,977	2626,5	371,7
	30	0,7192	0,940	3283,1	442,5
50:50	5	0,0486	0,970	3611,4	38,1
	10	0,0643	0,956	4268,0	44,9
	20	0,0932	0,959	4924,7	65,9
	30	0,1494	0,939	5581,3	88,3

En la Tabla N° 24, se pueden observar todos los valores de viscosidades aparentes correspondientes a cada una de las emulsiones a la tasa de corte correspondiente y a una temperatura de 50°C. Igualmente en la tabla se pueden observar los valores de las constantes K y n que se obtienen de los reogramas de cada emulsión (Anexo N° 4). Se puede observar que los valores de viscosidad disminuyen a medida que aumenta la cantidad de diesel con que se diluye el crudo Cerro Negro, esto se debe a la disminución en la viscosidad que sufre la fase continua como consecuencia de las diluciones.

IV.2.2.3.3 Potencia y Número de Potencia

Tabla N° 25. Potencia de Mezclado y Número de Potencia

Relación Crudo /Diesel	Porcentaje de Agua (%)	Potencia de Mezclado (w)	Po
70:30	5	40,83	2,60
	10	43,21	2,65
	20	63,37	2,65
	30	67,27	2,79
50:50	5	53,50	2,32
	10	71,82	2,32
	20	98,71	2,35
	30	112,82	2,37

En la Tabla N° 25, se presentan los valores correspondientes a la potencia de mezclado y el número de potencia para las emulsiones realizadas con el impulsor tipo rotor/estator T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type, por ser de este tipo hubo que caracterizar el impulsor y los resultados son los mostrados en la tabla anterior. Para impulsores del tipo Rushton, se encuentran gráficos en donde se encuentran relacionados el número de potencia con el número de Reynolds. (Ver Anexo N° 5). Se puede observar que a medida que aumenta la cantidad de diesel diluyente y a medida que aumenta el agua dispersa aumenta la potencia consumida. El caso más crítico es el correspondiente a la emulsión cuya fase continua posee 50% de diesel y en la que se disperso 30% de agua, el valor de potencia consumido fue de 112,82 w y el número de potencia asociado a este valor de potencia fue de 2,37.

IV.2.2.3.4 Régimen de mezclado

Ahora conociendo tanto el número de Reynolds como el número de Potencia, se puede determinar en que régimen se preparó cada una de las emulsiones, si se toma el promedio de los números de potencia (2,5) se puede calcular el límite que establece donde comienza el régimen turbulento, este número es 4860, en la Tabla N° 26 se muestran tales resultados.

Tabla N° 26. Regímenes de flujo

Relación Crudo /Diesel	Porcentaje de Agua (%)	Re (adim.)	Régimen
92,5:7,5	5	14,8	Laminar
	10	15,7	Laminar
	20	30,8	Laminar
	30	54,0	Laminar
70:30	5	289,3	Transición
	10	247,8	Transición
	20	433,5	Transición
	30	457,1	Transición
50:50	5	5841,5	Turbulento
	10	5858,1	Turbulento
	20	4605,2	Transición
	30	3895,2	Transición

En la Tabla N° 26, se puede observar que 6 de las emulsiones fueron realizadas en el régimen transitorio, otras 4 fueron realizadas en el régimen laminar y 2 de ellas en el régimen turbulento. Es importante recordar que de las 12 emulsiones hechas, 8 fueron preparadas usando el T.K. Homo Mixer Mark II, Vacuum Type. Este es uno de los motivos por los que se decidió hacer el escalamiento usando este tipo de impulsor.

IV.2.2.3.5 Escalamiento del Impulsor

IV.2.2.3.5.1 Potencia del Motor

Tabla N° 27. Potencia del Motor

Potencia Específica (w/Kg)	Potencia del Motor (HP)
418,80	8,42

Como se mencionó anteriormente para poder realizar el escalamiento es necesario tomar el caso más crítico, que corresponde al caso en el que se haya consumido mayor cantidad de potencia. En la Tabla N° 25, se puede apreciar que este valor pertenece a la emulsión de relación crudo/ diesel de 50:50 y con un contenido de 30% de fase interna, este

valor es de 112,82 W. La masa de las emulsiones preparadas fue de 269,39g, ya que esta cantidad se ajusta a los requerimientos del mezclado estándar.

El valor de 418W/Kg representa la potencia entregada al fluido para dimensionar el diámetro de gota de esa emulsión, es importante destacar que esta potencia se entregó en un período de 10 minutos. De acuerdo a los criterios de escalamiento se debe proporcionar la misma potencia por unidad de masa.

Estableciendo el volumen de diseño del Mezclador MD-101 en 15 l como se mencionó en el apartado III.3.2.3.2.1.1 del capítulo III y con la masa correspondiente a ese volumen se calculó la potencia de mezclado requerida para la reproducción de las emulsiones en el laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep. Este valor fue 8,42 HP (6282W), por lo tanto es necesario que el motor del mezclador sea capaz de generar esta potencia.

Tomando en cuenta la eficiencia de los motores comerciales y la potencia que generalmente manejan los mismos su sugiere la utilización de un motor de 10 HP.

IV.2.2.3.5.2 Diámetro y otras medidas del Impulsor

Con la ecuación 36 es posible obtener el valor del diámetro para el nuevo impulsor, el valor del número de potencia se conserva para así preservar el principio de similitud dinámica, tal valor se encuentra en la Tabla N° 25, la densidad de la mezcla es la misma ya que se esta preparando la emulsión bajo las mismas condiciones de trabajo, la potencia es la calculada en la ecuación 34, por último, es necesario determinar la velocidad a la cual se va a realizar la emulsión, esta velocidad debe ser tal, que pueda ser desarrollada por el motor a ser utilizado, y de igual modo se debe asegurar que con tales parámetros el régimen sea transitorio o turbulento para que así el proceso se desarrolle de manera similar. La velocidad escogida fue de 3000 RPM, puesto que esta es una velocidad comercialmente

manejable por motores en distintas aplicaciones, incluidas aplicaciones de mezclado y formación de dispersiones. Así, se obtiene el siguiente diámetro para el impulsor:

Tabla N° 28. Diámetro del Impulsor escalado.

Diámetro (m)
0,12

Preservando la similitud geométrica, y usando la ecuación 37 es posible determinar el resto de las medidas del impulsor, las cuales se muestran en la Tabla N° 29 e igualmente en la Figura N° 42 se pueden observar a que parte del impulsor corresponden esas medidas.

Tabla N° 29. Medidas originales y medidas escaladas del Impulsor

Medida	a	b	c	d	e	f	g
Escala 1 (mm)	14,90	5,36	4,73	11,59	5,99	1,68	23,60
Escala 2 (cm)	6,22	2,24	1,97	4,84	2,50	0,70	9,85
Medida	i	j	k	l	m	n	
Escala 1 (mm)	4,84	3,08	9,52	8,52	13,9	27,84	
Escala 2 (cm)	2,02	1,29	3,97	3,56	5,80	11,62	

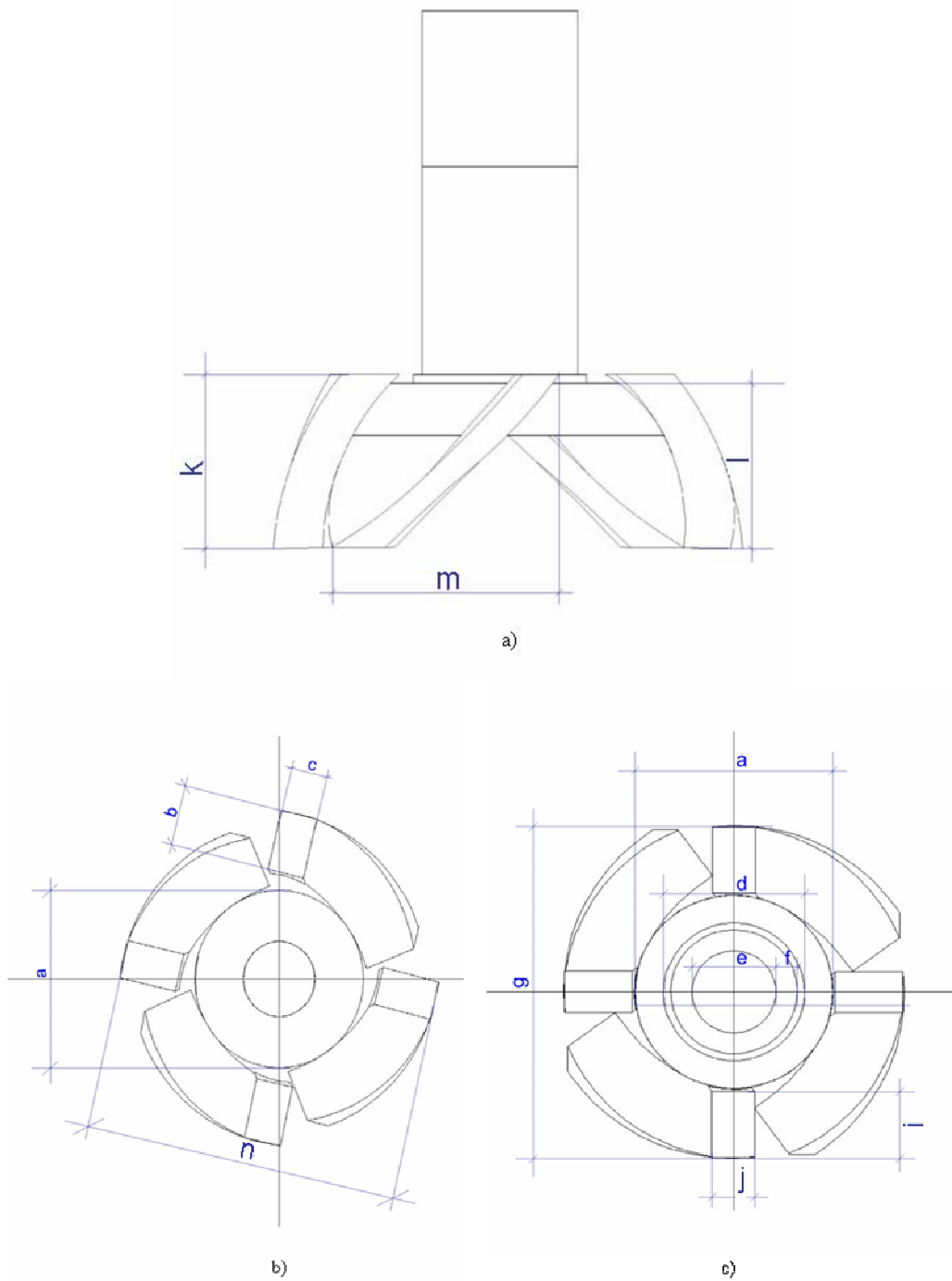


Figura N° 42. Dimensiones del Impulsor. a) Vista frontal. b) Vista Inferior. c) Vista Superior

IV.2.2.3.5.3 Material del Impulsor

El impulsor será fabricado de acero inoxidable, puesto que es un material resistente a la corrosión y es usado con bastante frecuencia en la fabricación de impulsores y de igual forma es el material utilizado por excelencia en la industria para este tipo de procesos.

IV.2.2.3.6 Recipiente

Tabla N° 30. Características del recipiente del MD-101

Material	Diámetro Interno (m)	Diámetro Externo (m)	Espesor (mm)	Altura (m)	Volumen (l)
Acero Inoxidable	0,14	0,15	5	0,65	10

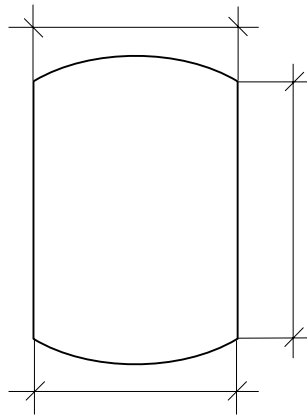


Figura N° 43. Tanque del mezclador dinámico MD-101

Tanto en la Tabla N° 30 como en la Figura N° 43 se pueden observar las medidas correspondientes al recipiente del mezclador dinámico MD-101, con la medida del diámetro interno y la medida del diámetro del impulsor se obtendrá el equipo de mezclado del tipo rotor / estator.

IV.2.2.3.6.1 Material del Recipiente

El material del tanque será igualmente de acero inoxidable ya que este material es resistente a la corrosión

0,15 m

IV.2.2.4 Reproducción de Emulsiones en el MD-101

Se hace necesario que las emulsiones a ser producidas en el laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA – Intevep posean las mismas propiedades que las preparadas en el laboratorio de levantamiento de Físicoquímica de Producción, por lo tanto se hace necesario conservar la tasa de corte para aquellas emulsiones preparadas en el régimen laminar o en el régimen de transición cercano al régimen laminar y se debe conservar la misma potencia específica para aquellos casos en que la emulsión fue preparada en régimen turbulento o en el régimen de transición cercano al régimen turbulento.

Tabla N° 31. Velocidades del Impulsor escalado

Relación Crudo /Diesel	Porcentaje de Agua (%)	N_2 (RPM)	Diámetro de Gota esperado (μm)
92,5:7,5	5	318	2,6
	10	318	4,8
	20	796	4,1
	30	955	3,6
70:30	5	2090	6,5
	10	2090	6,7
	20	1975	6,6
	30	1981	4,8
50:50	5	1951	2,3
	10	2153	2,8
	20	2383	3,1
	30	2485	4,0

En la Tabla N° 31, se pueden observar los valores correspondientes a las velocidades que debe desarrollar el impulsor para obtener el diámetro de gota deseado que es una de las características más importante de la emulsión como tal, se puede notar que a medida que aumenta la cantidad de diesel para la dilución del crudo Cerro Negro y a medida que aumenta el porcentaje de agua a dispersar mayor en la velocidad que debe poseer el impulsor, como ya se ha mencionado anteriormente, estas son condiciones que adversan la formación en sí de la emulsión, para compensar esto se aumenta la velocidad que se traduce en un aumento en la tasa de corte y a su vez en un aumento en la potencia específica.

Las velocidades del impulsor por lo observado en la tabla deben ir desde 318 hasta 2485 RPM, por lo que se recomienda que el motor seleccionado pueda operar entre un rango de 200 hasta 3000RPM.

IV.2.3 Modificaciones en el Circuito de Prueba del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.

Para poder integrar los nuevos equipos al actual circuito de pruebas del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep es necesario realizar ciertas modificaciones en el mismo, para que así se puedan realizar dichas pruebas de la manera más óptima posible.

En la Figura N° 44 se pueden observar los cambios propuestos para constituir el nuevo circuito de pruebas, primeramente se tiene la nueva entrada al reservorio, una vez que es formada la emulsión en el mezclador dinámico MD-101, es bombeada por la bomba B-106 hasta conectarse con la tubería que llevará el fluido hasta el reservorio de donde será “levantado” por acción del sistema BES. Se propone de igual forma que se instale un toma-muestra justo antes de la entrada al reservorio, para así poder recolectar muestras y hacer el análisis del diámetro promedio de gota de las emulsiones que será de suma importancia para la evaluación del desempeño del sistema BES. Igualmente debe instalarse en esta zona un medidor en línea de viscosidad, para saber con certeza cual es la viscosidad del fluido que esta entrando al sistema BES.

La segunda de las modificaciones se basa en la creación de un bypass para saltar el separador bifásico y el intercambiador de calor que son utilizados en el circuito actual de pruebas. Habrá una tubería que estará conectada justo antes de la entrada del separador bifásico y que irá hasta lo que se concebirá como el sistema de separación de emulsiones.

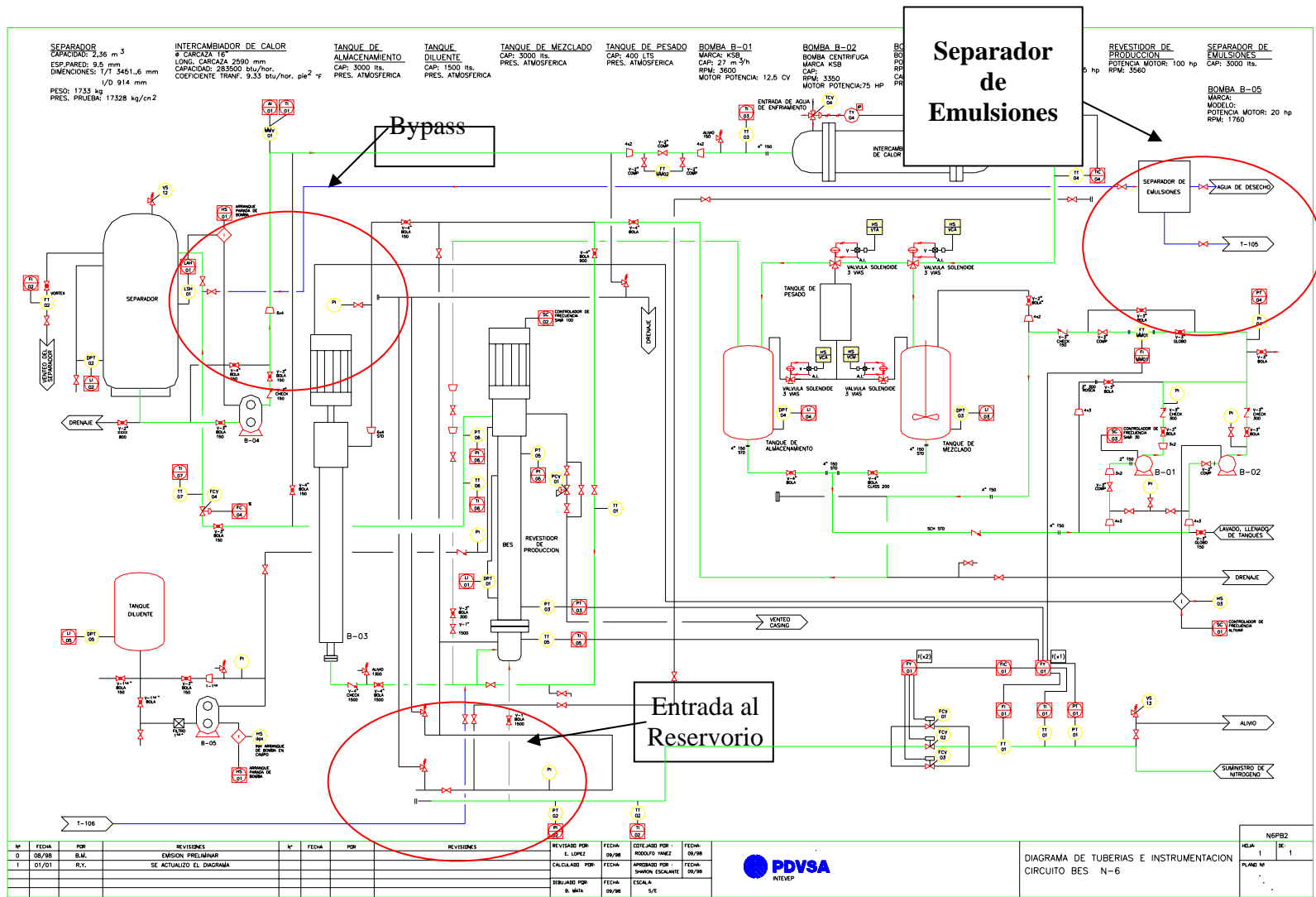


Figura N° 44. Modificaciones del Actual Circuito de Pruebas del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep

Por último se propone la creación de un sistema para el rompimiento de las emulsiones que permita separar la fase interna (agua) de la fase externa (crudo), esta sistema debe ser tal que permita separa una gran gama de emulsiones pues el nuevo circuito de pruebas contemplará la formación de varios tipos de emulsiones con variaciones tremendas en cuanto a viscosidad y con distinto porcentajes de agua.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones a las que se llegaron en el presente trabajo especial de grado:

V.1 EMULSIONES

- Todas las dispersiones preparadas en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción poseen un diámetro de gota tal que pueden ser catalogadas como emulsiones.
- La mayoría de las emulsiones realizadas en el laboratorio de Fisicoquímica de producción de PDVSA – Intevep se hicieron en un estado de no equilibrio.
- Las emulsiones realizadas en el laboratorio de Fisicoquímica de producción de PDVSA – Intevep presentan un alto grado de polidispersidad.
- Las emulsiones realizadas en el laboratorio de fisicoquímica de producción de PDVSA-Intevep pueden ser almacenadas a lo sumo por 7 días, excepto para aquellas emulsiones que coalescieron antes de este tiempo, para estos casos en específico el tiempo de almacenamiento será menor que el tiempo de coalescencia.
- La adición de TOFA (Tall oil fatty acids) y MEA (Mono etanol amina) permitió obtener emulsiones estables al utilizar crudo Cerro Negro diluido en 50% de Diesel y al dispersar 5 y 10% de agua.
- A pesar de la adición de TOFA y MEA no se obtuvieron emulsiones estables por mas de 2 días al utilizar crudo Cerro Negro diluido en 50% de diesel y al dispersar 20 y 30% de agua.

- Las emulsiones que fueron pasadas por el reómetro de coalescencia poseen una estabilidad dinámica tal que pueden resistir la coalescencia de acuerdo a las condiciones a las que serán sometidas en el nuevo circuito de pruebas en el laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.
- Los diámetros de gota de las emulsiones son mayores para la dilución del crudo Cerro Negro con 30% de diesel que para la dilución con 7,5%, pero se obtienen diámetros de gota menores para la dilución con 50% de diesel por la utilización de TOFA y MEA como sustitutos de los surfactantes naturales del crudo Cerro Negro.
- La viscosidad de las emulsiones se incrementa a medida que la cantidad de agua dispersada es mayor.

V.2 LABORATORIO DE LEVANTAMIENTO ARTIFICIAL

- El actual circuito de pruebas no posee los equipos necesarios para la producción de emulsiones, por lo que se hace necesario la creación de nuevas facilidades experimentales
- Las nuevas facilidades experimentales estará constituidas por seis (6) tanques de almacenamiento, un (1) tanque para el calentamiento del crudo diluido, tres (3) bombas centrífugas, cinco (5) bombas de desplazamiento positivo y un (1) mezclador dinámico que será el equipo mas importante del nuevo circuito.
- El mezclador dinámico posee un impulsor del tipo rotor-estator, que fue escalado en base a las experiencias realizadas en el laboratorio de Físicoquímica de Producción de PDVSDA-Intevep.
- Para realizar el escalamiento del impulsor se conservó la similitud geométrica en las dimensiones del impulsor.

- Para el dimensionamiento del impulsor se escogió el caso más crítico, que fue aquél en el que se utilizó la mayor cantidad de potencia específica conservando este parámetro como base del escalamiento.
- Para la reproducción de las emulsiones realizadas en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción en régimen laminar o en régimen de transición cercano al límite con el régimen laminar, se consideró mantener la misma tasa de corte.
- Para la reproducción de las emulsiones realizadas en el laboratorio de Fisicoquímica de Producción en régimen turbulento o en régimen de transición cercano al límite con el régimen turbulento se consideró mantener la misma energía específica.
- Las modificaciones de actual circuito de pruebas serían principalmente tres: la conexión directa al reservorio mediante una tubería proveniente del tanque de almacenamiento de emulsiones T-106, un bypass con el que se evitaría utilizar el separador bifásico y el intercambiador de calor y por último la creación de un sistema que permita el rompimiento de las emulsiones para la futura reutilización de sus componentes.

RECOMENDACIONES

A continuación se presentan algunas recomendaciones a seguir si se desea ampliar o proseguir lo relacionado a este trabajo especial de grado:

- Ampliar las diluciones hechas con diesel al crudo Cerro Negro, para así aumentar la gama de emulsiones a producir en el nuevo circuito de pruebas del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.
- Ampliar los porcentajes de agua a dispersar con el fin de obtener la información necesaria para su posterior reproducción en laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep.
- Variar las proporciones de TOFA (Tall Oil Fatty Acids) y MEA (Mono etanol amina) para intentar conseguir emulsiones más estables del tipo W/O al dispersar proporciones superiores al 20% de agua cuando se utiliza como fase continua crudo Cerro Negro diluido con 50% de diesel.
- Utilizar otros crudos de distintas viscosidades como fase continua para la formación de emulsiones a nivel del laboratorio de Físicoquímica de Producción para así evaluar su reproducción en el laboratorio de Levantamiento Artificial y con ello conseguir ampliar la gama de emulsiones a producir.
- Evitar el almacenamiento prolongado de las emulsiones para evitar la coalescencia de las mismas.
- Realizar el rompimiento de las emulsiones mediante procedimientos físicos para así evitar alterar la matriz química del crudo.

- Reutilizar el crudo una vez rota la emulsión, para la producción de nuevas emulsiones.
- Evaluar la posibilidad de utilizar los tanques de almacenamiento existentes en el actual circuito de prueba del laboratorio de Levantamiento Artificial de PDVSA-Intevep como parte de los nuevos equipos que formarán parte del nuevo circuito de pruebas.
- Realizar las modificaciones necesarias para evaluar el escenario en el que el crudo y el agua entran sin formar una emulsión a la BES.

BIBLIOGRAFÍA

- 1 SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS. “*Petroleum Engineering handbook*”, 1992.
- 2 CENTRILIFT “*Submersible Pump Handbook*” Sixth edition, Claremore, EE.UU, 1997.
- 3 <http://www.mcnallyinstitute.com/07-html/7-8.html>, 29/11/04, 10:27 a.m.
- 4 PATTERSON, J y otros, “*Emulsion Viscosity Testing with ESP’s*”. Electric Submersible Pump Workshop, Houston, EE.UU. 2002.
- 5 REYNOLDS, R., “*Produced Water and Associated Issues*” 2003.
- 6 FONDO EDITORIAL DEL CENTRO INTERNACIONAL DE EDUCACIÓN Y DESARROLLO (FONCIED) “*El Pozo Ilustrado*” Primera edición en CD, Caracas, 1998.
- 7 <http://www.glossary.oilfield.slb.com>
- 8 QUIJADA, O. “*Informe de Pasantías: Área de Bombeo Electrosumergible*” PDVSA – Intevep, Los Teques, 2001.
- 9 SOCIETY OF PETROLEUM ENGINEERS “*Artificial Lift*”, 1989.
- 10 PEÑA, M y Escalante S. “*Manual de Prácticas Recomendadas en Bombeo Electrosumergible*” Informe Técnico PDVSA – Intevep, INT-10126,2003. Los Teques, 2003.
- 11 TORRES, G., “*Bombeo Electrocentrífugo*” CIED, 1989.

12 PEÑA, M., “*Diseño de un prototipo para el escalamiento del comportamiento de bombas electrosomergibles con mezclas de crudo pesado (14 a 16 °API), agua y gas*” Puerto Cabello, Venezuela, 1997.

13 SALAGER, J., “*Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para Obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte A, Introducción y Conceptos de Formulación Físico Química*”. Cuaderno FIRP S747-A. Mérida, Venezuela. 1999.

14 SALAGER, J., “*Formulación, Composición y Fabricación de Emulsiones para Obtener las Propiedades deseadas. Estado del Arte. Parte B, Propiedades de las Emulsiones y su Medición*”. Cuaderno FIRP S747-B. Mérida, Venezuela. 1999.

15 LANGEVIN, D. y otros, “*Crude Oil Emulsion Properties and their Application to Heavy Oil Transportation*”. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 59 (2004), No. 5, pp. 511-521.

16 GUTIEERREZ, X. y otros. “*Surfactant package and water in hydrocarbon emulsion*”

17 KOKAL, S., “*Crude Oil Emulsions A state Of-The Art Review*”. SPE 77497, SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, Texas, EE.UU., 2002

18 BECKER, J.R., “*Crude Oil Waxes, Emulsions and Asphaltenes*”. Tulsa, Oklahoma, 1997.

19 <http://www.chevrontexacoursa.com/Spanish/glossary/v.html> 10/02/05, 10:27.

20 http://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Stokes, 26/06/05, 7:24 p.m.

21 McGRATH, G., “*Mezclado en la Industria Petrolera*”. PDVSA – Intevep, Los Teques, Venezuela, 2000.

22 HAAKE “*Instrucciones de manejo Rotovisco RV30 M*” Alemania, 1989.

23 McGRATH, G. y otros. “*Manual de control de Calidad de Orimulsión con base en la Estabilidad Dinámica*” Informe Técnico PDVSA – Intevep, INT- M-0275,1998. Los Teques, Venezuela, 1998.

24 Oldshue, J., “*Biotechnology Processes. Scale –up and Mixing*” American Institute of Chemical Engineers, New York, USA, 1987.

25 WALAS, S., “*Chemical Process Equipment. Selection and Design*” . Butterworth-Heinemann, Newton, Ma. USA.

ANEXOS

Anexo N° 1. Problemas en bombas electrosumergibles asociados a emulsiones. Distrito Barinas.

En el distrito Barinas se realizan actividades de explotación de los diferentes yacimientos petrolíferos de crudos livianos y medianos ubicados en los llanos occidentales (Cuenca Barinas – Apure).

En el área de Barinas se realizan operaciones en doce (12) campos ubicados en el estado Barinas en los Municipios Barinas y Obispos, a una distancia de la ciudad de Barinas entre 29 – 46 Km y abarca una superficie aproximada de 138 m².

En el área de Apure se realizan operaciones en dos (2) campos (Guafita y la Victoria), ubicados en el municipio Páez del estado Apure, a una distancia aproximada de 50 y 100 Km de la población de Guasdualito y abarca una superficie de 36 y 13 Km² respectivamente.²⁶

En la Figura N° 45, se pueden apreciar los estados Barinas y Apure, señalados en ellos los municipios en donde se encuentran los campos petroleros.

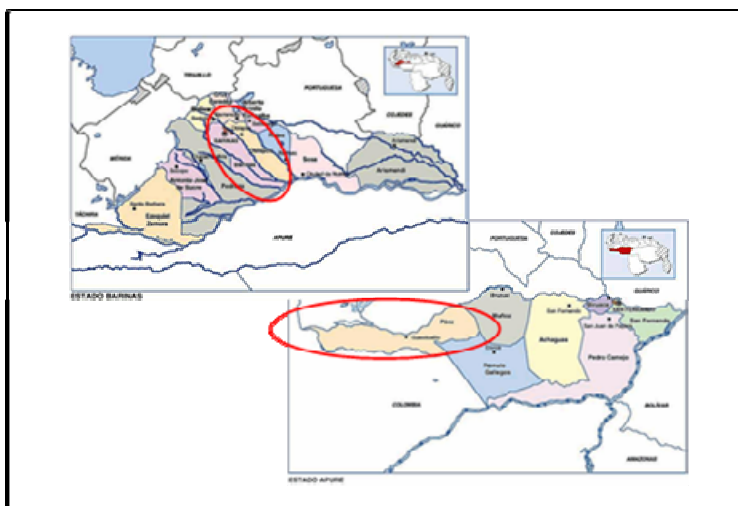


Figura N° 1. Ubicación de los campos productores en los estados Apure y Barinas

El Campo Guafita es uno de los campos de producción del estado apure, en él se encuentran activos en la actualidad 144 pozos, en la Figura N° 46 se muestra un mapa de ubicación de pozos en este campo.



Figura N° 2. Ubicación de Pozos, Campo Guafita

En la Figura N° 46 se encuentran señalada la ubicación de los pozos GF-105 y GF-144, ambos producen del yacimiento G-9, estos son dos de los pozos de este campo que han reportado problemas relacionados a la formación de emulsiones. Estos problemas han afectado al desempeño de las bombas causando daños en las mismas.

En la Tabla N° 32, se muestra el historial de producción del pozo GF-105 desde septiembre del año 2003 hasta septiembre del año 2004, como se puede notar el porcentaje de aguas y sedimentos es en promedio 79%, típico de la producción de los campos de la zona Apure–Barinas, la gravedad del crudo aquí producido es en promedio unos 29,1 °API.

Tabla N° 1. Historial de Producción pozo GF-105

Fecha	BTPD	BNPD	AyS	°API
04/09/2003	816	212	72	29,2
07/10/2003	794	210	72	29,2
06/11/2003	816	154	80	29,4
05/12/2003	732	97	86	29,1
27/12/2003	788	171	77	29,2
14/01/2004	716	122	82	29,1
24/02/2004	680	129	80	28,8
09/03/2004	778	176	76	28,8
01/04/2004	746	169	76	28,0
19/07/2004	2225	362	83	29,0
20/07/2004	2051	156	92	29,8
25/07/2004	1987	343	82	29,1
30/07/2004	2088	435	78	29,1
18/08/2004	2208	481	78	29,1
08/09/2004	2120	641	68	29,1

En el año 2002, el equipo de fondo del pozo GF-105, comienza a trabajar fuera de rango, disminuyendo considerablemente la eficiencia del equipo, esto conllevó a que el pozo produjera por debajo del 50% de sus niveles esperados de producción.

Se decide entonces instalar un sistema de inyección de química demulsificante por recirculación, la cual consistió en inyección de química por el anular entre el revestidor de producción del pozo y la tubería de producción, la dosis de demulsificante viajaba por gravedad hasta la entrada de la bomba (intake) con la finalidad de romper la emulsión, pero este tratamiento no fue efectivo. El estudio de emulsión realizado al fluido del pozo arrojó que el tipo de emulsión es de agua en crudo y el contenido es de 76% de emulsión. Luego

para solventar el problema de emulsión se propuso la inyección de un solvente que rompiera la emulsión a nivel del yacimiento.

Se resuelve realizar trabajos de estimulación, para lo que se bombean el 21/05/02, 35 bls de solvente a la formación para así romper la emulsión. Se cambió el equipo BES. Luego de este tratamiento se elevaron los niveles de producción, pero no hasta los niveles deseados.

El pozo siguió teniendo problemas con emulsiones, se decide aplicar nuevamente tratamiento con solvente, por lo que 30/04/04 se desplazan 156 lbs de solvente, en un proceso que duró algo más de 17 horas, debido a que el solvente se inyectó por etapas ya que al agregar el solvente se incrementaba mucho la presión.

El tratamiento no tuvo efectos positivos, pruebas realizadas el 10/05/04 arrojó que el porcentaje de aguas y sedimentos era del 100%, por lo que el pozo quedó inactivo.²⁷

En la Tabla N° 33, se muestra el historial de producción del pozo GF-144 desde septiembre del año 2003 hasta septiembre del año 2004, como se puede notar el porcentaje de aguas y sedimentos es de 82%, que al igual que el pozo GF-105 representa un alto corte de agua, el crudo acá producido tiene unos 29°API en promedio.

Tabla N° 2. Historial de Producción pozo GF-144

Fecha	BTPD	BNPD	AyS	°API
05/09/2003	4105	620	84	29,5
02/10/2003	3321	628	80	29,4
01/11/2003	4536	687	84	29,5
06/12/2003	4593	785	82	29,8
20/01/2004	3722	635	82	29,1
06/02/2004	3752	639	82	29,1
05/03/2004	3657	698	80	28,8
17/04/2004	4396	750	82	29,1
04/05/2004	4614	875	80	28,8
10/06/2004	4627	877	80	28,8
01/07/2004	4408	669	84	28,8
14/07/2004	4598	697	84	28,8

28/07/2004	4372	622	85	28,5
06/08/2004	4442	633	85	28,5
16/08/2004	4412	671	84	28,8

Igualmente en el campo Guafita, el pozo GF-144 ha presentado problemas de emulsión que no han sido solucionados hasta la actualidad. A continuación, en el Gráfico N° 24, se muestra una gráfica donde se exhiben algunos parámetros del sensor de fondo existente en este pozo.

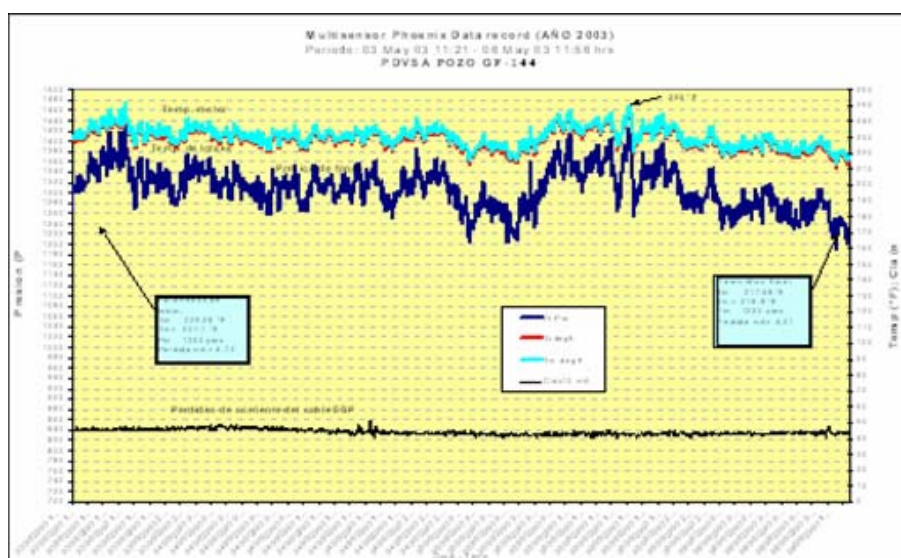


Gráfico N° 1. Datos del sensor de fondo pozo GF-144

En este gráfico se puede observar oscilaciones en la presión de la toma (intake) que varían desde 1200 psi hasta valores de 1420 psi, de igual modo la temperatura del motor se ha hecho crítica fluctuando entre 220 y 250 °F. Estos desajustes pueden ser atribuidos en parte al manejo de un fluido emulsionado por ciclos, típico de los fluidos extraídos en Guafita.

En la Figura N° 47 se puede observar una de las cartas amperimétricas de este pozo:

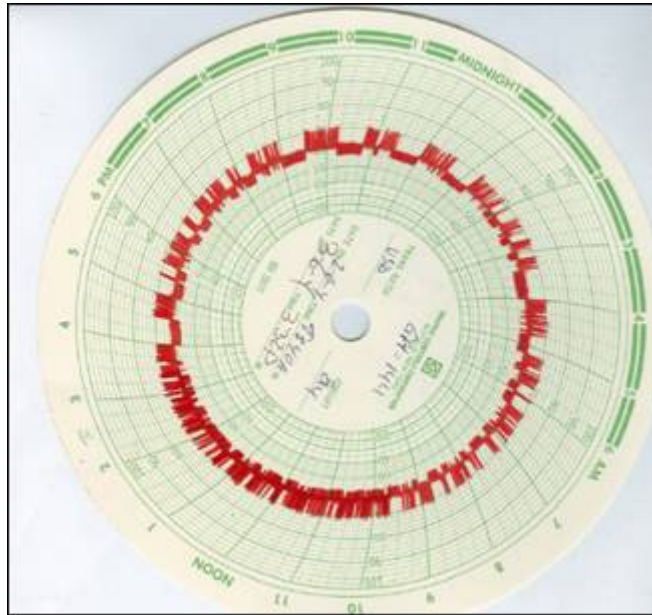
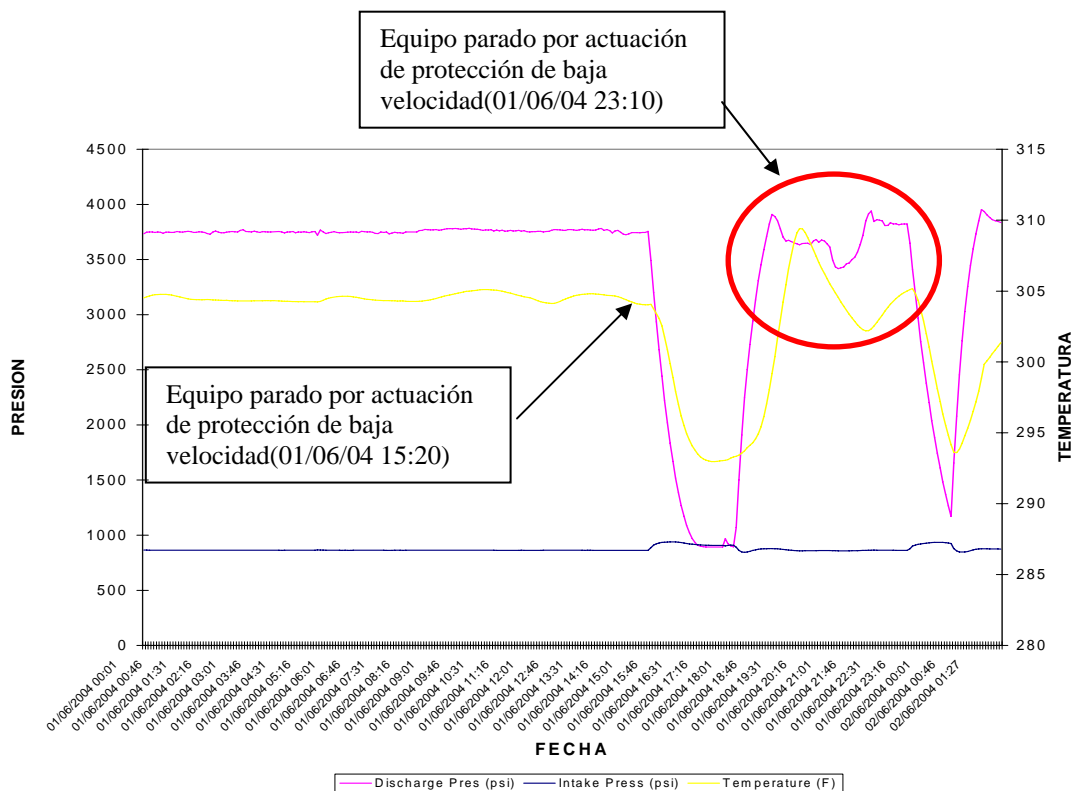


Figura N° 3. Carta Amperimétrica del Pozo GF-144

Se puede observar en esta figura que hay variaciones de hasta 14 ampers para el consumo de energía del motor de este pozo, este es un comportamiento que se puede presentar por presencia de gas, pero en este caso es descartable puesto que el contenido del mismo en las segregaciones de estos campos es insignificante, por lo tanto se puede atribuir estas variaciones a un problema de formación de emulsiones. **¡Error! Marcador no definido.**

Otros de los campos en los que se ha reportado problemas relacionados al manejo de emulsiones es Borburata, en el Gráfico N° 25 se observa los datos del sensor de fondo del pozo BOR-17.



En este gráfico se puede observar los puntos en los que el equipo se detuvo, en primera instancia el día 01/06/04 a las 15:20 horas, en donde se presume pudo haber ocurrido una baja de voltaje que pudo haber aumentado el consumo eléctrico obligando al VSD a bajar su velocidad para mantener carga hasta llegar al límite inferior donde se dispara el equipo de protección de baja velocidad. En el 2º evento ocurrido ese mismo día a las 23:10 horas, el equipo se dispara por baja velocidad, sin embargo, la data de los sensores de fondo muestra que el equipo presenta condiciones de bombeo posiblemente con alta viscosidad causada por la existencia de la emulsión. ²⁸

Anexo N° 2. Procedimiento Experimental detallado para la prueba de estabilidad dinámica de emulsiones.

Descripción de la prueba

La prueba de estabilidad con el Reómetro de Coalescencia consta de cuatro etapas:

- Preparación de la muestra
- Establecer las condiciones de la prueba
- Medir la estabilidad dinámica
- Limpiar el equipo

A continuación se describen las acciones a seguir para cada etapa mencionada anteriormente.

Primera etapa. Preparación de la muestra.

- Tomar una muestra de un galón de la emulsión
- Mezclar bien.
- Tomar una muestra de 1800 ml
- Temperar la muestra a una temperatura de 33-34 °C.

Segunda etapa. Establecimiento de las condiciones de la prueba.

- Asegurarse que las válvulas #4 y #5 estén cerradas.
- Verter la muestra dentro del tanque.
- Después de sellado el tanque, cerrar la válvula #2.
- Conectar entonces la línea de aire al tanque, abriendo la válvula #1.
- Regular la presión en el tanque, con salida del compresor a 40 psig.
- Colocar la manguera de salida de la celda sobre el beaker, de modo sin hacer contacto para no introducir pesos adicionales.

- Previamente antes de establecer las condiciones de la prueba, llenar el sistema abriendo suavemente la válvula #4 y cerrarla hasta observar emulsión en la manguera de salida de la celda.
- **El pase 0**, durante el cual el motor estará apagado, consta del siguiente procedimiento: Con una mano en la válvula #4 y en la otra el cronómetro, abrir completamente la válvula y a partir del instante que se inicia la descarga del producto dentro del beaker, accionar el cronómetro para medir el tiempo de flujo. Al tener un peso de aproximadamente 1350g, cerrar la válvula #4 y parar el cronómetro simultáneamente.
- Registrar el tiempo de flujo y la masa final observada.
- Despresurizar el tanque, y para eso, cerrar la válvula #1 y abrir la válvula de alivio #2.
- Verificar mediante el cálculo, el tiempo de residencia durante el cual es sometido el producto, a través de la celda del reómetro. Este tiempo, debe situarse dentro del rango de 2.5 - 3.3 segundos.

$$Trn = \frac{Vr}{Qv} \quad \text{Ec. 1}$$

donde

Trn: Tiempo de residencia nominal

Vr: volumen del reómetro(ml): 114 ml

Qv: flujo volumétrico (ml/s)

$$Qv = \frac{m}{t \cdot \rho} \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

m: masa de la emulsión (gr)

t: tiempo de la prueba (s)

ρ : densidad de la emulsión (gr/ml)

Se supone que la densidad de las emulsiones a ser formadas es prácticamente igual a 1.0 g/ml, y por lo tanto, la masa en gramos es equivalente al volumen en mililitros.

- Si el tiempo de residencia es menor a 2.5 s, se debe reducir la presión a 35 psig y proseguir al Pase 1.
- Si el tiempo de residencia es mayor a 3.3 s, se debe aumentar la presión a 45 psig y proseguir al Pase 1.
- Tomar una muestra pequeña de la muestra madre, para luego analizar el tamaño y distribución de gotas, mediante el procedimiento descrito en el apartado III.1.1.4.3 de este capítulo. Esta es la muestra del PASE 0.

Tercera etapa. Evaluación de la estabilidad dinámica

- Asegurarse que las válvulas #4 y #5 estén cerradas.
- Verter la muestra dentro del tanque.
- Después de sellado el tanque, cerrar la válvula #2.
- Conectar entonces la línea de aire al tanque, abriendo la válvula #1.
- Regular la presión en el tanque, de acuerdo al valor establecido durante el Pase 0.
- Colocar la manguera de salida de la celda sobre el beaker, de modo sin hacer contacto para no introducir pesos adicionales.
- En el controlador del motor, colocar la velocidad de 6500 rpm.
- Encender el controlador y cuando el variador indique 3000 rpm, abrir la válvula #4 y accionar el cronómetro simultáneamente.
- Al tener un peso de 1350g aproximadamente, de manera simultánea, cerrar la válvula #4, parar el cronómetro y apagar el motor todo de una sola vez.
- Registrar el tiempo y el peso final de la muestra y reportar el tiempo de residencia.
- Despresurizar el tanque, y para eso, cerrar la válvula #1 y abrir la válvula de alivio #2.
- Temperar la muestra a 30°C, agitándola suavemente para acelerar el enfriamiento.

- Tomar una muestra pequeña, para luego analizar el tamaño y distribución de gotas, mediante el procedimiento descrito en el apartado III.1.1.4.3 de este capítulo. Esta es la muestra del PASE 1.
- En este punto de esta tercera etapa, analizar las condiciones existentes tanto de tiempo de residencia como de viscosidad de la muestra, a fin de decidir la presión acorde a colocar, para continuar dentro del rango de tiempo de residencia ya establecido.
- Una vez la muestra haya alcanzado los 30°C, se repite esta etapa 3. Esta repetición se realizará hasta el pase 7, siempre y cuando la muestra no observe deterioro, es decir presencia de grumos y/o bitumen libre; en este caso, el diámetro promedio de gota habrá aumentado en más de un 20% su valor del pase 0.

Cuarta etapa. Limpieza del equipo

Cada vez que se completa una prueba, haya o no superado los 7 pases, el equipo requiere de una limpieza con Kerosen, en todas sus partes: tanque, tuberías de flujo, celda y manguera. Esta etapa es muy importante, para la precisión de la prueba.

A continuación se describen los pasos a seguir durante la limpieza del equipo:

- Cada vez finalizada una prueba, el tanque aún contiene un remanente de emulsión. Este se descargará inicialmente del sistema, utilizando la presión suministrada por el compresor
- Válvulas #4 y #5 cerradas.
- Tanque cerrado y válvula de alivio #2 cerrada.
- Válvula #1 abierta y presión recomendada de 40 psig.
- Una vez presurizado el sistema, abrir suavemente la válvula #4 e iniciar la descarga de la emulsión remanente en el tanque y la celda, hasta el beaker.
- Al completar la descarga, cerrar la válvula #1 y despresurizar el tanque abriendo la válvula #2
- Válvula # 5 aún continúa cerrada

- El proceso continúa ahora, con recirculación de Kerosen entre el tanque y la celda, es decir, quitar por completo la tapa del tanque y llenar con 1500ml aproximadamente. Previamente, para asegurar que el rotor no girará en el aire o con producto deteriorado, el sistema se presurizará nuevamente tal como se ha descrito anteriormente, para llenar tanto las líneas de flujo como la celda, con kerosén. Antes de la presurización, no olvidar cerrar la válvula #4
- Para continuar descargando con mejor efectividad, accionar el motor a 3000 rpm hasta observar salida únicamente de Kerosén, este paso se realiza con mayor facilidad, abriendo suavemente la válvula #4 y permitiendo descargas instantáneas del Kerosén. Luego cerrar completamente la válvula #4, apagar el motor y abrir la válvula #2 para aliviar cualquier remanente de presión.
- No drenar el Kerosén completamente, para así dejar un volumen adecuado para la recirculación.
- Paso siguiente, recirculación propiamente dicha con la válvula #3 y #4 abiertas.
- Direccionar la manguera de salida de la celda, hacia la boca del tanque.
- Colocar en el controlador 4000 rpm y accionar para encender el motor y comenzar la recirculación.
- Permitir este proceso, durante unos 5 min o hasta observar que no queda emulsión adherida a las paredes de la manguera.
- Drenar totalmente este Kerosén sucio, abriendo la válvula #5.
- Presurizar el sistema nuevamente, para drenar con aire el Kerosén sucio remanente.
- Repetir por segunda vez, la recirculación con Kerosén limpio y en este momento, debe observarse bastante limpio. Ahora el sistema se encuentra limpio, tanto tanque como líneas de flujo y celda.
- Paso siguiente, es el secado con aire del compresor, el cual puede realizarse independiente tanto en el tanque como en la celda, o ambos simultáneamente. En cualquiera de los casos, el drenaje se realizará por la válvula #5. El tiempo a emplear, será hasta observar salida de aire totalmente seco, por el drenaje de la válvula #5.

- Ahora el reómetro se encuentra disponible, para una siguiente prueba. **¡Error! Marcador no definido.**

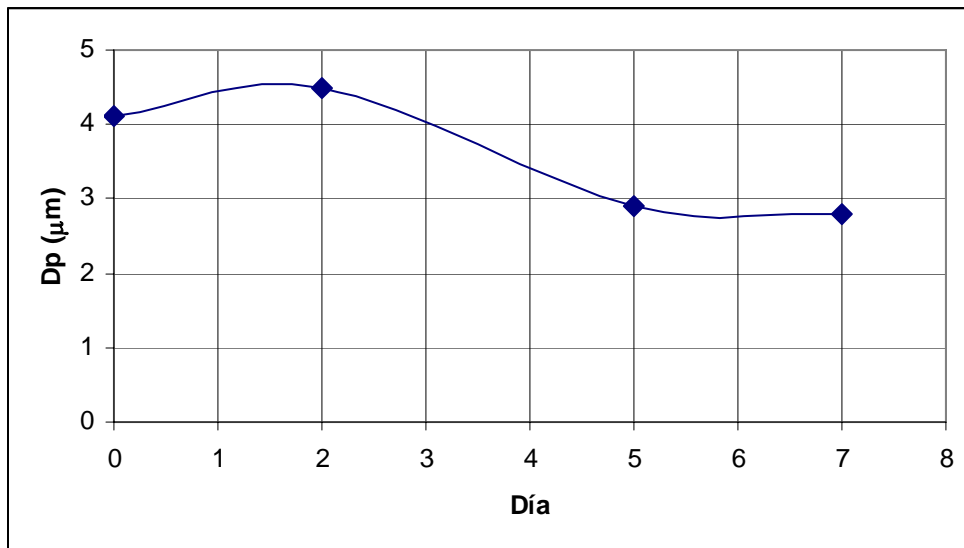
Anexo N° 3. Estabilidad estática de Emulsiones.

Gráfico N° 3. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 2500RPM.

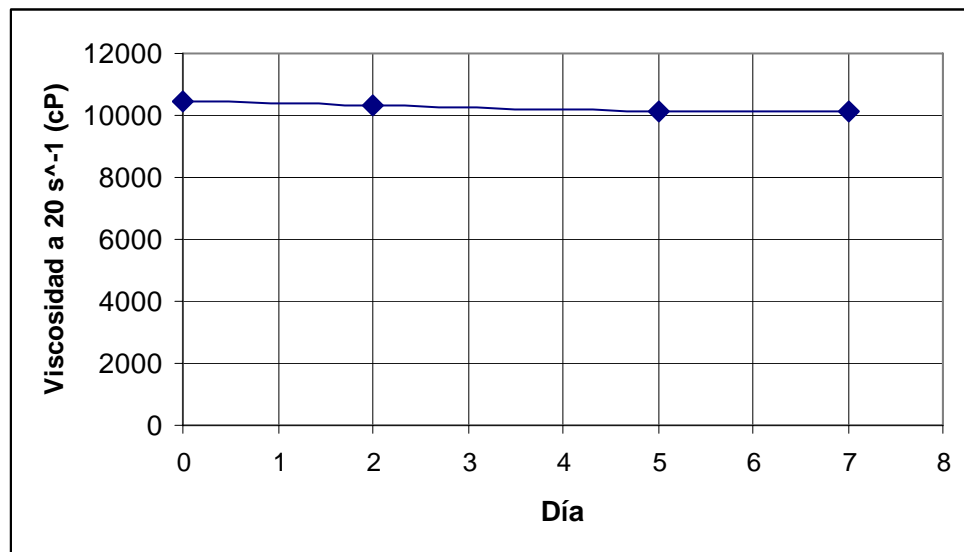


Gráfico N° 4. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 2500RPM. Temperatura: 50 °C.

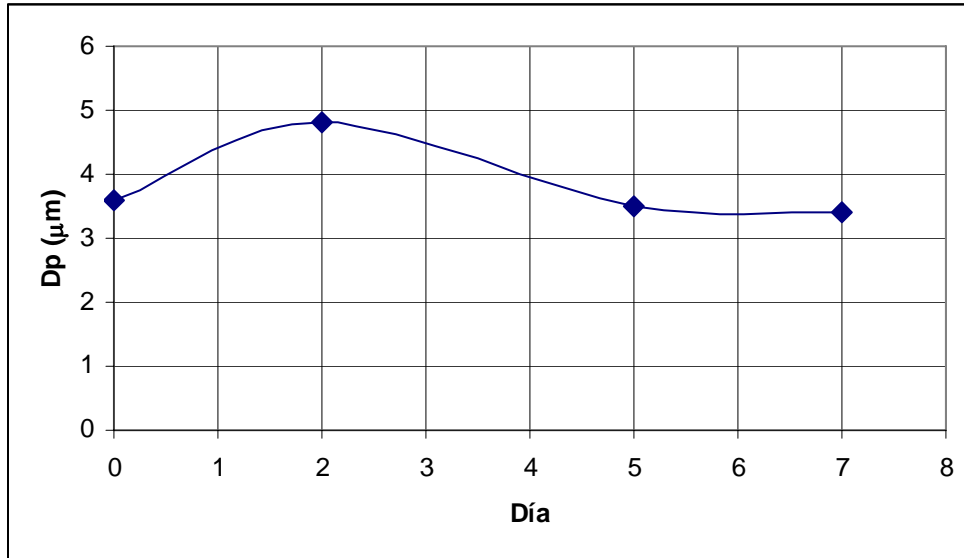


Gráfico N° 5. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 3000RPM

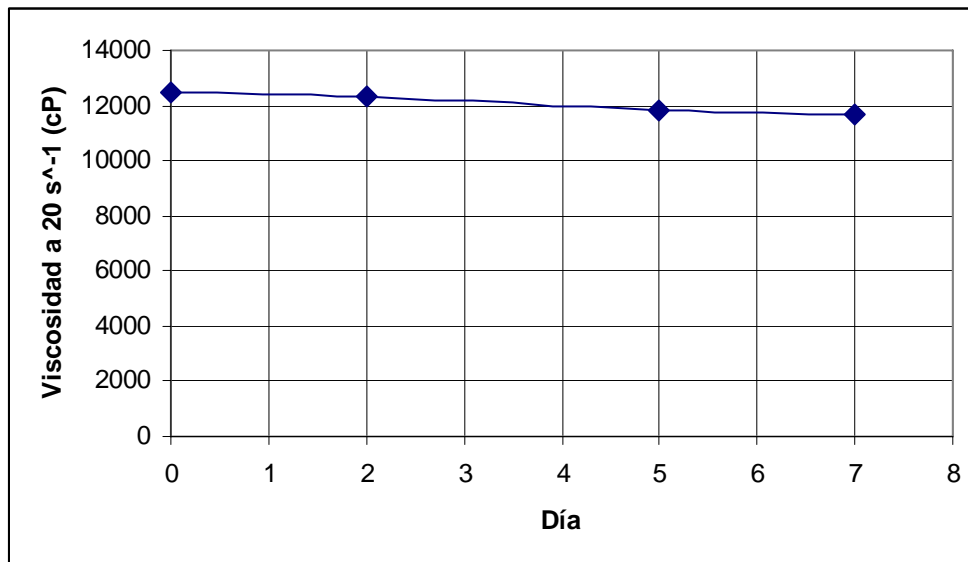


Gráfico N° 6. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 3000RPM. Temperatura: 50 °C.

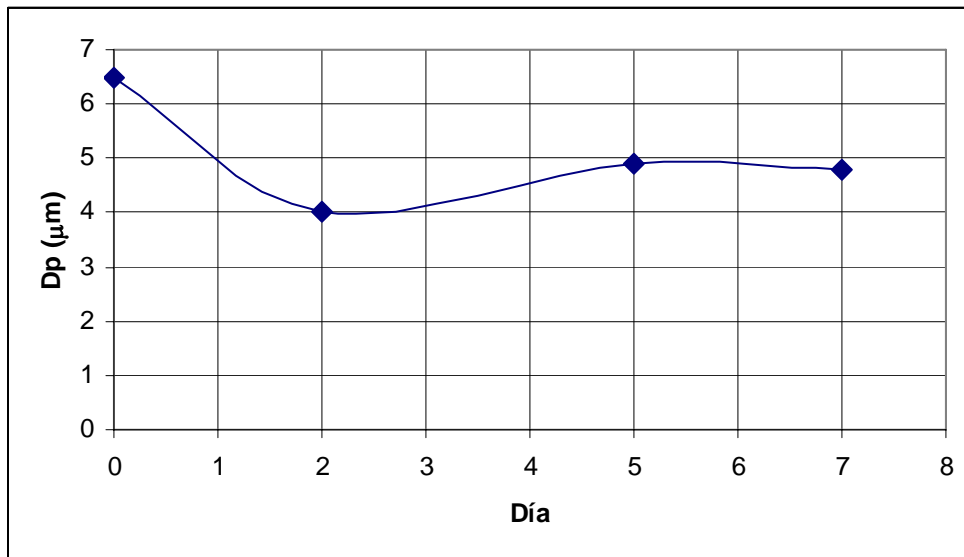


Gráfico N° 7. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 2000RPM.

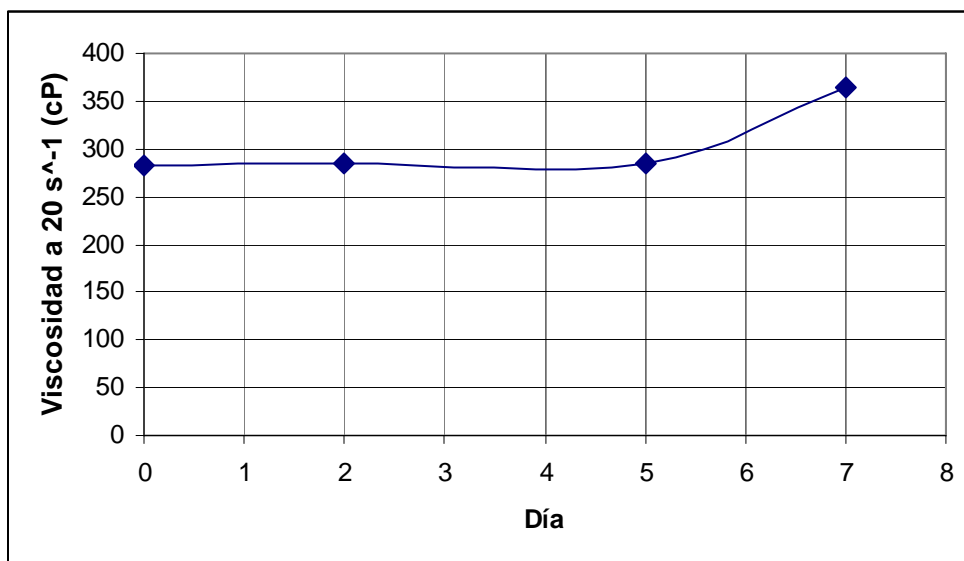


Gráfico N° 8. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 2000RPM. Temperatura: 50 °C.

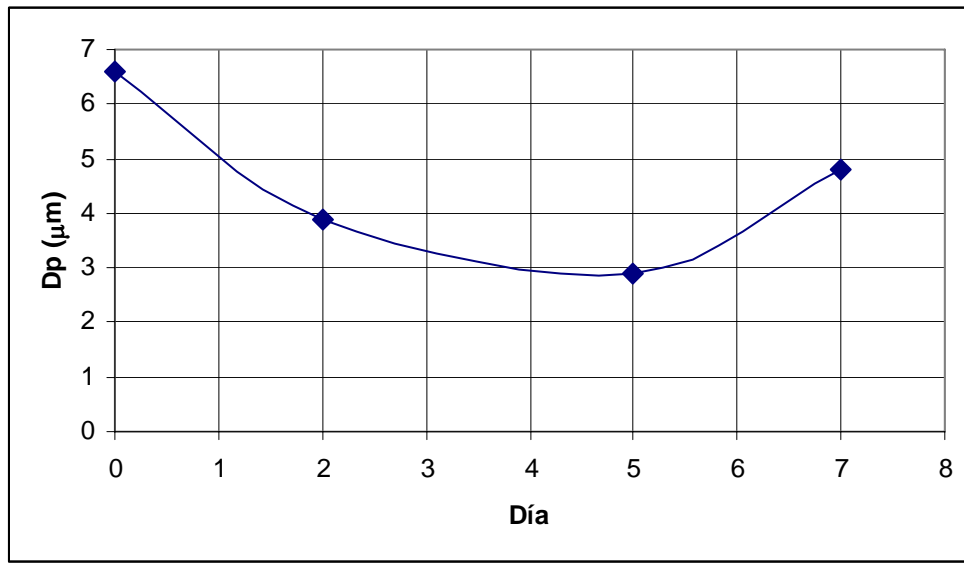


Gráfico N° 9. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 4000RPM.

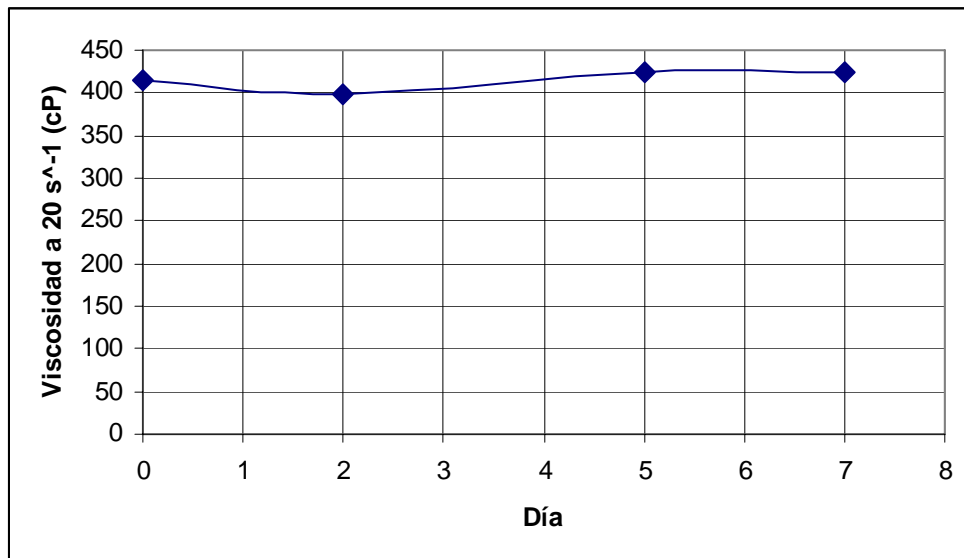


Gráfico N° 10. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 4000RPM. Temperatura: 50°C.

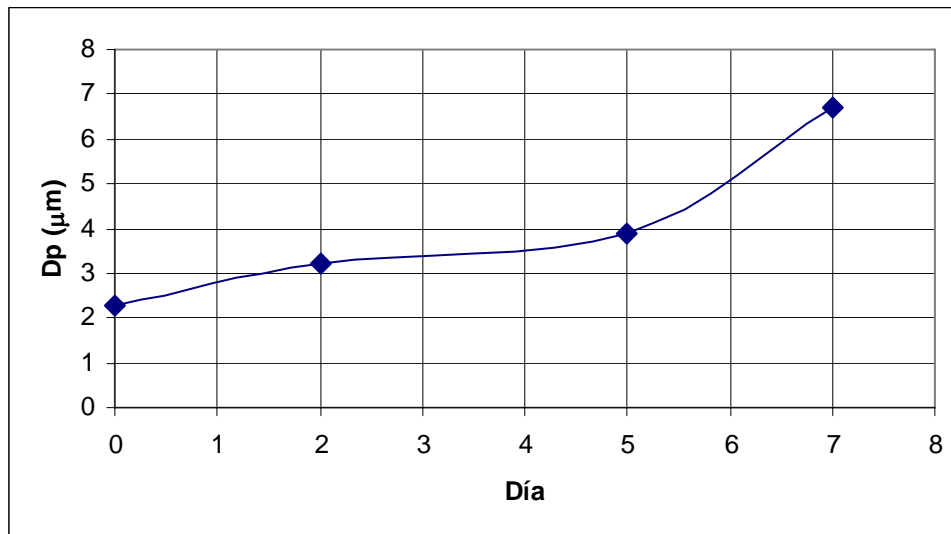


Gráfico N° 11. Variación del Tamaño de Gota con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0.126% MEA.

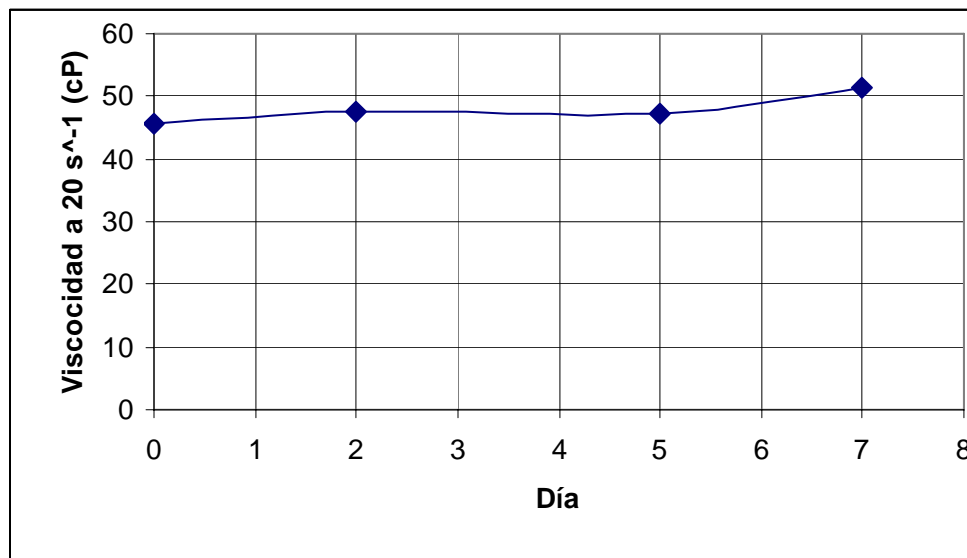


Gráfico N° 12. Variación de la Viscosidad Aparente con respecto al Tiempo. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 5500RPM. Surfactantes: 5% TOFA, 0.126 MEA. Temperatura: 50°C.

Anexo N° 4. Reogramas

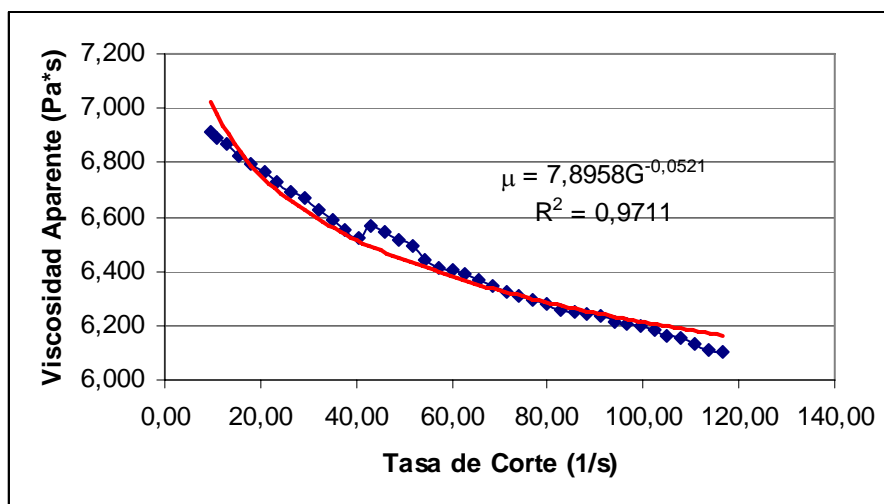


Gráfico N° 13. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 1000RPM.

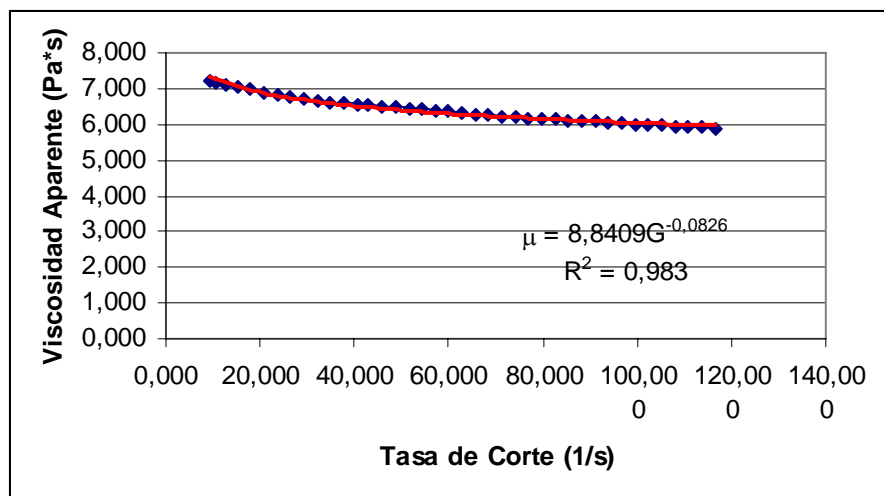


Gráfico N° 14. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 1000RPM.

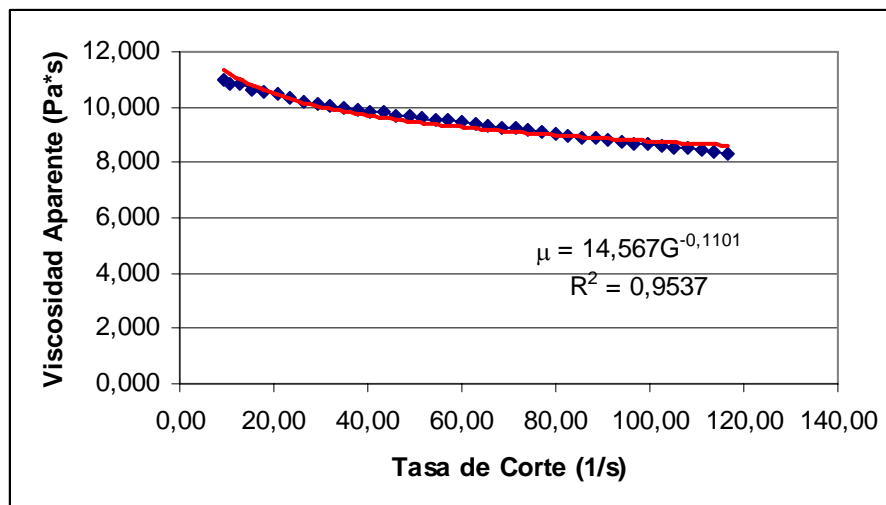


Gráfico N° 15. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 2500RPM.

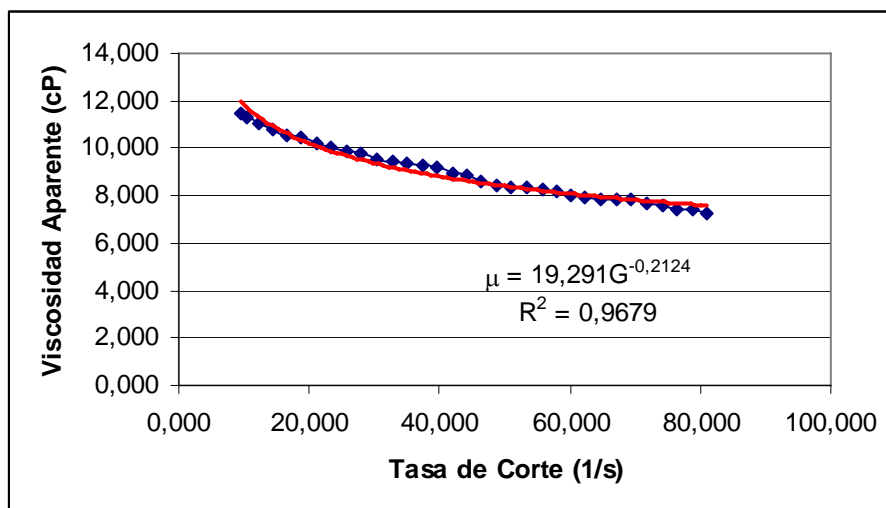


Gráfico N° 16. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 92,5:7,5. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 3000RPM.

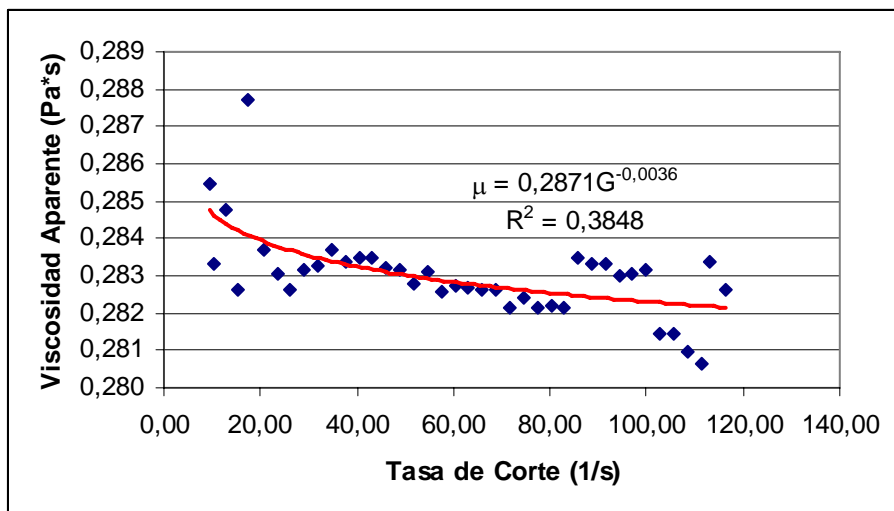


Gráfico N° 17. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 2000RPM.

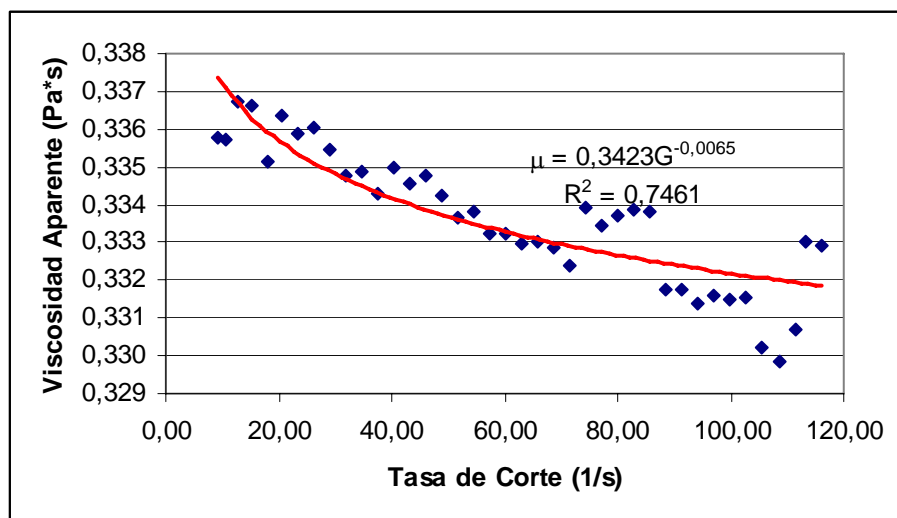


Gráfico N° 18. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 2000RPM.

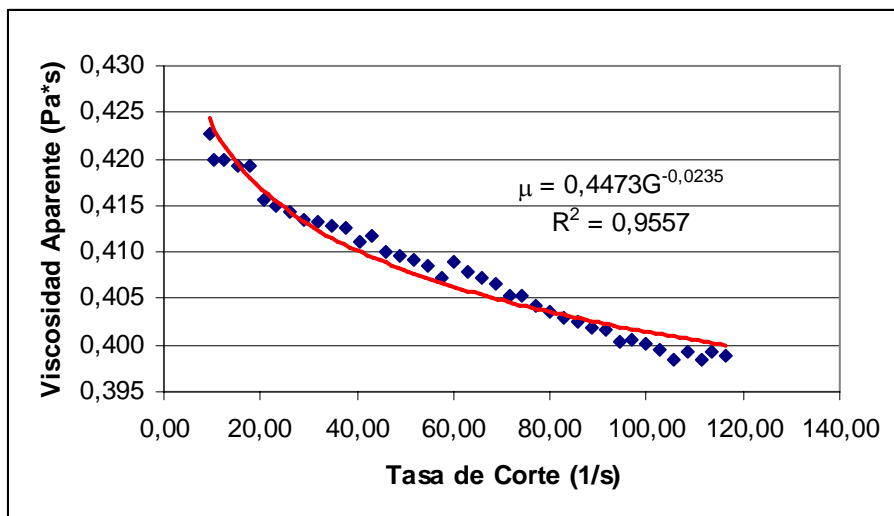


Gráfico N° 19. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 4000RPM.

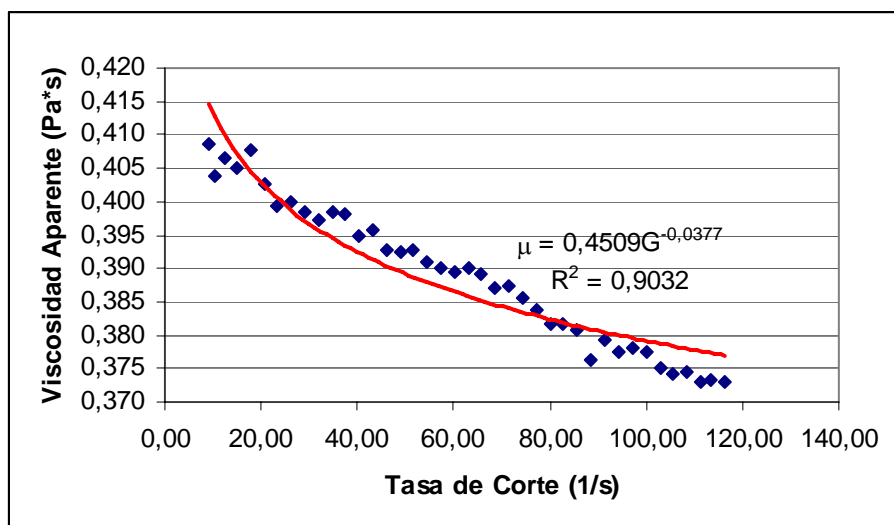


Gráfico N° 20. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 70:30. Agua dispersa: 30%. Velocidad de Formación: 5000RPM.

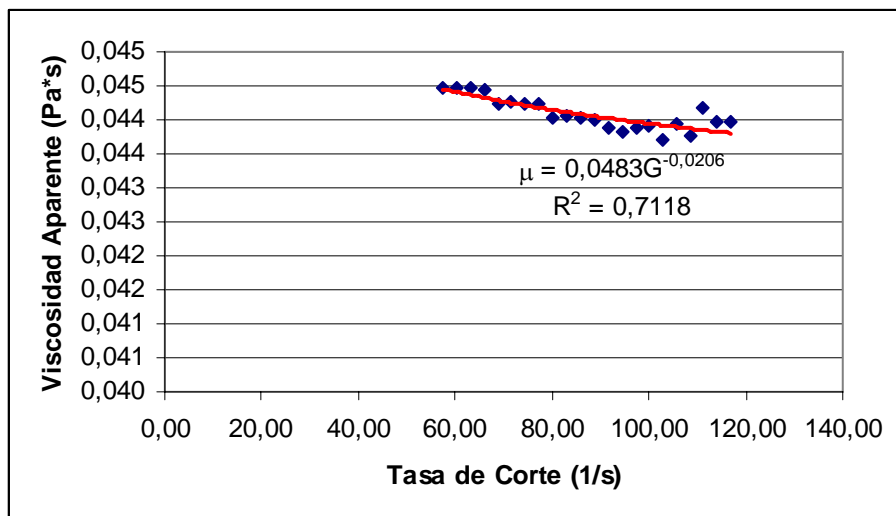


Gráfico N° 21. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diésel: 50:50. Agua dispersa: 5%. Velocidad de Formación: 5500RPM. 5 % TOFA. 0,126% MEA.

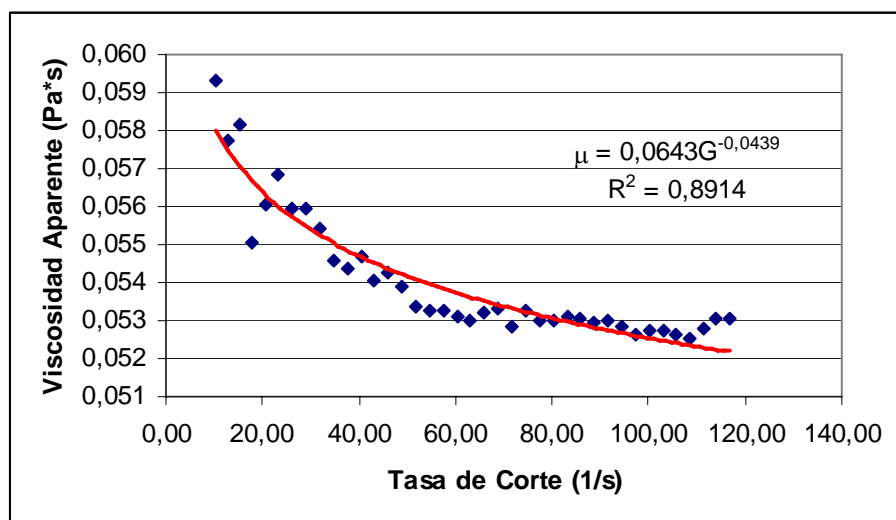


Gráfico N° 22. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diésel: 50:50. Agua dispersa: 10%. Velocidad de Formación: 6500RPM. 5 % TOFA. 0,126% MEA.

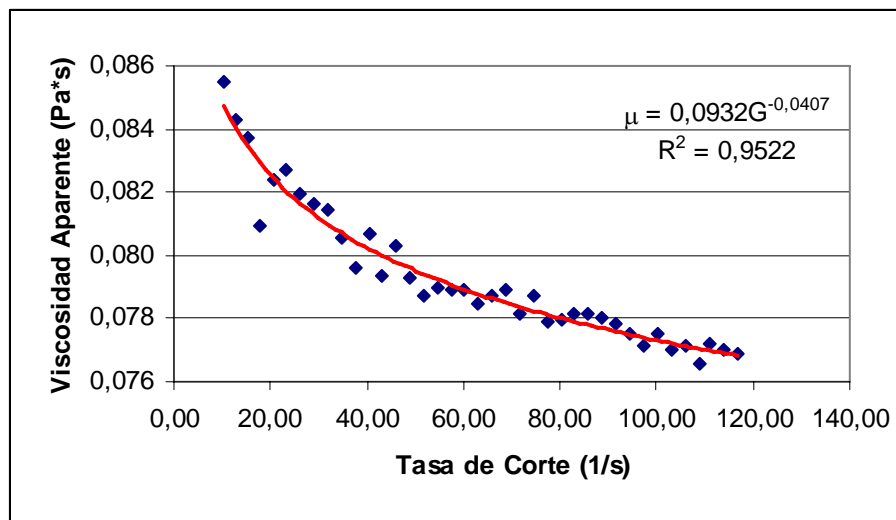


Gráfico N° 23. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 7500RPM. 5 % TOFA.

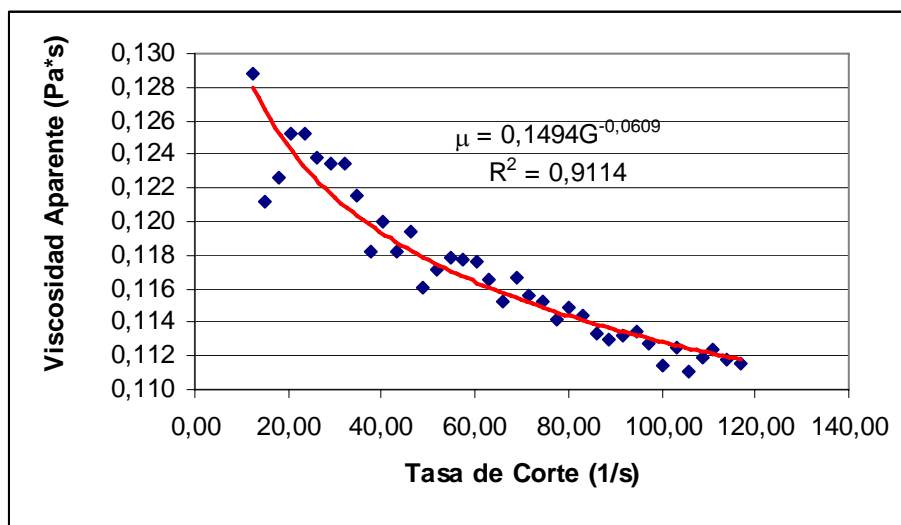


Gráfico N° 24. Viscosidad en función de la tasa de Corte. Relación Crudo/Diesel: 50:50. Agua dispersa: 20%. Velocidad de Formación: 8500RPM. 5 % TOFA. 0,0066% MEA

Anexo N° 5. Número de Potencia Impulsor Rushton

