



UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE PETRÓLEOS

TEMA:

**“EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A CRUDOS
PESADOS CON ADICIÓN DE DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE
LABORATORIO”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

CARLOS ALBERTO TOLEDO ARIZAGA
NEXI NOEMI FLORES LÓPEZ

TUTOR:

ING. CARLOS MALAVÉ CARRERA, MSc.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2026

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE PETRÓLEOS

TEMA:

**EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS
APLICADOS A CRUDOS PESADOS CON ADICIÓN DE
DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE
LABORATORIO**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

CARLOS ALBERTO TOLEDO ARIZAGA

NEXI NOEMI FLORES LÓPEZ

TUTOR:

ING. CARLOS MALAVE CARRERA, MSc.

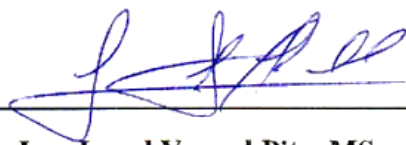
LA LIBERTAD – ECUADOR

2026

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Marllelis Gutiérrez H, PhD
DIRECTOR DE CARRERA



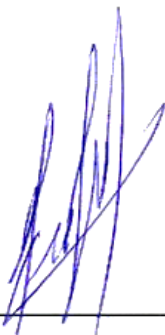
Ing. Israel Yagual Pita, MSc
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Carlos Malavé Carrera, MSc
DOCENTE TUTOR



Ing. David Vega Gonzalez
SECRETARIO DEL TRIBUNAL



Ing. Edison Brito Ávila
DOCENTE DE LA UIC

DEDICATORIA

Dedico esta tesis en primer lugar a Dios, por ser mi luz, fortaleza y guía en este camino que iluminó mis pasos. A mis padres Jhonny Flores y Azucena López por su apoyo constante, moral y económico, a mis hermanas Melanny Flores y Anne Flores por creer en mí incluso en los momentos más difíciles. Y, finalmente, pero no menos importante, a mi pareja, por acompañarme a lo largo de este trabajo compartido con paciencia, comprensión y apoyo incondicional. Gracias a todos ustedes por ser parte de este logro que también les pertenece.

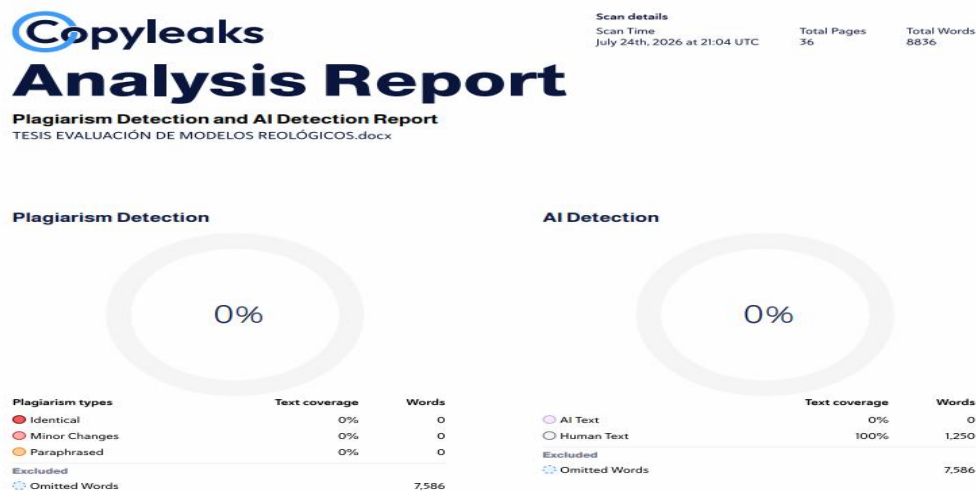
Flores López Nexi Noemí

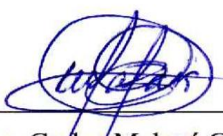
Quiero dedicar este trabajo a Dios, la gloria solo es de él y de nadie más, a mi madre Rosario Arízaga y mi hermano menor Jean Toledo quienes me apoyaron invaluablemente en todo momento a ser mejor persona, cumplir mis estudios y a no rendirme, a los demás integrantes de mi familia que me alentaron a seguir mejorando en mi área de estudio y a mi novia quien me ha acompañado en toda la carrera hasta culminarla juntos.

Toledo Arízaga Carlos Alberto

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “**EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A CRUDOS PESADOS Y CON ADICIÓN DE DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO**” elaborado por los estudiante **CARLOS ALBERTO TOLEDO ARÍZAGA Y NEXI NOEMÍ FLORES LÓPEZ**, egresado de la carrera de Ingeniería en Petróleos, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, permitimos declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio **Copyleaks**, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 0% de la valoración permitida.



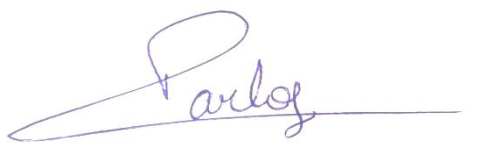

Ing. Carlos Malavé Carrera
C.I.: 091237009

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **CARLOS ALBERTO TOLEDO ARÍZAGA Y NEXI NOEMÍ FLORES LÓPEZ**, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado **“EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A CRUDOS PESADOS Y CON ADICIÓN DE DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO”**, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

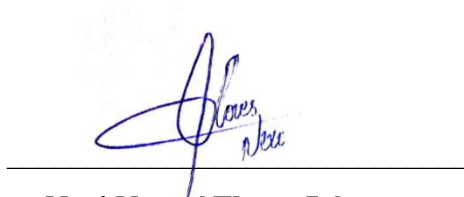
Atentamente,



Carlos Alberto Toledo Arízaga

Autor de Tesis

C.I. 2450458886



Nexi Noemí Flores López

Autora de tesis

C.I. 0958528531

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Carlos Malavé Carrera, MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **“EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A CRUDOS PESADOS Y CON ADICIÓN DE DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO”**, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Petróleos elaborado por los Sres. **CARLOS ALBERTO TOLEDO ARÍZAGA Y NEXI NOEMÍ FLORES LÓPEZ**, egresado de la carrera de Petróleos Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.



ING. CARLOS MALAVÉ CARRERA
TUTOR

VALIDACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRAFÍA

CERTIFICO

Que, he revisado el trabajo de Integración Curricular de título: **EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A CRUDOS PESADOS CON ADICIÓN DE DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO**, elaborado por los estudiantes de la Carrera de Petróleos de la Universidad Estatal Península de Santa Elena: **TOLEDO ARIZAGA CARLOS ALBERTO** y **FLORES LÓPEZ NEXI NOEMI**, previo a la obtención del título de Ingeniero en Petróleos.

Que, he realizado las observaciones pertinentes en los ámbitos de la gramática, ortografía y puntuación del documento, mismas que han sido acogidas proactivamente por los mencionados estudiantes, corroborando que han sido introducidos los ajustes correspondientes en el trabajo en mención.

Por lo expuesto, autorizo a los peticionarios, hacer uso de este certificado como a bien convengan.

Atentamente,



Lic. Alexi Javier Herrera Reyes
Magíster en Diseño y Evaluación de Modelos Educativos
CC. 0924489255
Registro SENESCYT: 1050-14-86052904
Teléfono: 0962989420

La Libertad a los 13 días del mes de agosto de 2026.

AGRADECIMIENTOS

Antes que nada, elevamos el más profundo agradecimiento a Dios, porque en cada paso de este camino su amor, su fidelidad y misericordia ha estado presente. Gracias a él por sostenernos en los momentos de incertidumbre y renovar nuestras fuerzas cuando el cansancio parecía vencernos, sin él esto no hubiese sido posible.

A nuestro tutor Ing. Carlos Alberto Malavé Carrera, en calidad de persona expresamos el más sincero agradecimiento por compartimos generosamente su sabiduría, su orientación académica y el tiempo dedicado a enriquecer este trabajo con sus observaciones y recomendaciones. Gracias por inspirarnos, motivarnos e inculcarnos a mantener ese rigor científico en cada etapa del presente trabajo, su confianza, experiencia y compañía fueron esencialmente para convertir los obstáculos en posibilidades de formación y enseñanza. Es un honor haber contado con su guía para alcanzar este propósito.

De la misma manera, agradecemos al Ing. Carlos Portilla, Ing. Isidro Yagual, sobresalientes docentes y profesionales, quienes, con su vocación de enseñanza, compromiso y calidad humana, contribuyeron significativamente a nuestra formación académica y profesional.

De manera muy especial, al Ing. Sadi Iturralde, un extraordinario docente cuyo legado permanece vivo en quienes tuvimos el honor de aprender de él. Aunque hoy ya no nos acompaña físicamente, su ejemplo, dedicación y pasión por la enseñanza continúan inspirándonos. Con profundo amor y gratitud, respetamos su memoria a través de este trabajo, como un pequeño agradecimiento a la huella que dejó en nuestra formación y nuestra vida.

Finalmente, expresamos el agradecimiento a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por brindarnos la oportunidad de formarnos como profesionales, adquirir conocimientos y crecer tanto en el ámbito académico como profesional.

CONTENIDO

	Pág.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA.....	iii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	iv
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	v
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	vi
AGRADECIMIENTOS.....	vii
CONTENIDO	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABLAS.....	xiv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
CAPITULO I : INTRODUCCIÓN.....	18
1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	18
1.2 ANTEDECENTES	20
1.3 HIPÓTESIS	24
1.4 OBJETIVOS.....	25
1.4.1 Objetivo General.....	25
1.4.2 Objetivos Específicos	25
1.5 ALCANCE	25
1.6 VARIABLES.....	26
1.6.1 Variables Dependientes:.....	26
1.6.2 Variables Independientes.....	26

CAPITULO II : MARCO TEORICO.....	27
2.1 PETRÓLEO CRUDO.....	27
2.1.1 Clasificación del petróleo	27
2.1.2 Propiedades fisicoquímicas del petróleo	28
2.2 CRUDOS PESADOS	29
2.2.1 Características de los crudos pesados.....	29
2.2.2 Composición química.....	29
2.3 FUNDAMENTOS DE REOLOGIA	30
2.3.1 Concepto de reología.....	30
2.3.2 Concepto de fluido.....	31
2.3.3 Esfuerzo cortante	31
2.3.4 Tasa de corte.....	31
2.3.5 Viscosidad aparente.....	31
2.3.6 Reología de crudos pesados.....	32
2.3.7 Factores que afectan la viscosidad.....	34
2.4 REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD DEL CRUDO.....	35
2.4.1 Métodos tradicionales.....	36
2.4.2 Métodos químicos.....	37
2.4.3 Influencia del contenido de agua	38
2.4.4 Viscosímetro rotacional de Fann 35A	39
2.4.5 Ecuaciones para un fluido newtoniano del viscosímetro rotacional de Fann 35 A	40
2.4.6 Ecuaciones para un fluido no newtoniano en flujo plástico del viscosímetro rotacional de Fann 35A	41
2.5 MODELOS REOLÓGICOS.....	44
2.5.1 Modelo plástico de Bingham.....	45
2.5.2 Modelo de Ley de Potencia de Ostwald-de Waele.....	46
2.5.3 Modelo de Herschel-Bulkley.....	47
2.6 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA APROXIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS	48
2.6.1 Método de mínimos cuadrados y formulación matricial	49

2.6.2	Métodos matemáticos para la estimación de parámetros del modelo reológico de Bingham y Power Law.	50
2.6.3	Métodos matemáticos para la estimación de parámetros del modelo reológico de Herschel-Bulkley.....	51
2.7	VISCOSIDADES DE MEZCLAS DE CRUDOS PESADOS CON DILUYENTES.....	53
2.7.1	Modelo logarítmico de Arrhenius.....	54
2.7.2	Modelo de Grunberg-Nissan	55
CAPITULO III : METODOLOGÍA.....		56
3.1	TIPO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	56
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA	57
3.3	TIPO DE MUESTREO	57
3.4	VARIABLES DE ESTUDIO	58
3.5	RECURSOS EXPERIMENTALES	58
3.5.1	EQUIPOS	58
3.5.2	MATERIALES	59
3.6	DISEÑO EXPERIMENTAL	59
3.7	PREPARACIÓN VOLUMÉTRICA DE MEZCLAS	60
3.8	Método para la obtención de datos experimentales con el viscosímetro de fann35A.....	61
3.9	Conversión de unidades de datos obtenidos mediante el equipo de viscosímetro de Fann35A	62
3.10	Manejo de datos experimentales.....	62
3.11	Ajuste de los modelos reológicos	63
3.12	Evaluación estadística de los modelos reológicos.	63
3.13	Predicción de la viscosidad del crudo pesado y su mezcla con diluyente	64
CAPITULO IV : ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		65

4.1	CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS CRUDOS PESADOS Y CON DILUYENTES EVALUADOS.....	65
4.1.1	Caracterización reológica del crudo pesado ALFA.....	65
4.1.2	Caracterización reológica del crudo pesado OMEGA	68
4.1.3	Caracterización reológica del crudo Alfa con diluyentes seleccionados a diferentes concentraciones %V/V.	72
4.1.4	Caracterización reológica del crudo Omega con diluyentes seleccionados a diferentes concentraciones	77
4.2	Ajuste y comparación de modelos reológicos seleccionados para el crudo Alfa y mezclas con diluyentes	83
4.3	Ajuste y comparación de modelos reológicos seleccionados para el crudo Omega y mezclas con diluyentes	88
4.4	EVALUACIÓN PREDICTIVA DE LOS MODELOS DE VISCOSIDAD PARA MEZCLAS DE PETRÓLEO-DILUYENTE	92
4.4.1	Modelo de Arrhenius aplicado a la mezcla del petróleo pesado Omega y Alfa con diluyentes.....	92
4.4.2	Modelo de Grunberg-Nissan aplicado a la mezcla del petróleo pesado Omega y Alfa con diluyentes	94
CAPITULO V : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		98
5.1	CONCLUSIONES.....	98
5.2	RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		101
ANEXOS		107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Viscosímetro rotacional Fann modelo 35 A usado para realizar ensayos reológicos.....	39
Figura 2. <i>Caracterización reológica del crudo Alfa mediante la relación entre esfuerzo cortante y la tasa de corte a diferentes temperaturas.</i>	67
Figura 3. Caracterización reológica del crudo Alfa mediante la relación entre viscosidad aparente y la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	68
Figura 4. Caracterización reológica del crudo Omega mediante la relación entre esfuerzo cortante y la tasa de corte a diferentes temperaturas.	70
Figura 5. Caracterización reológica del crudo Omega mediante la relación entre viscosidad aparente y la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	71
Figura 6. Caracterización reológica del crudo Alfa-Diésel-1 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	72
Figura 7. Caracterización reológica del crudo Alfa-Diésel-1 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	73
Figura 8. Caracterización reológica del crudo Alfa-Diésel-1 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	74
Figura 9. Caracterización reológica del crudo Alfa-turbosina 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	75
Figura 10. Caracterización reológica del crudo Alfa-turbosina 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	76

Figura 11. Caracterización reológica del crudo Alfa-turbosina 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	77
Figura 12. Caracterización reológica del crudo Omega-Diésel-1 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	78
Figura 13. Caracterización reológica del crudo Omega-Diésel-1 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	79
Figura 14. Caracterización reológica del crudo Omega-Diésel-1 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	80
Figura 15. Caracterización reológica del crudo Omega-turbosina 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	81
Figura 16. Caracterización reológica del crudo Omega-turbosina 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	82
Figura 17. Caracterización reológica del crudo Omega-turbosina 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.....	83

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación del petróleo mediante criterios seleccionados y características de flujo.....	27
Tabla 2. Ecuaciones de las variables reológicas del viscosímetro de Fann 35A.....	41
Tabla 3. Comparación del modelo newtoniano y no newtoniano con flujo plástico.....	42
Tabla 4. Expresiones matemáticas a diferentes unidades de variables empleadas.....	44
Tabla 5. Modelos Reológicos empleados en estudios de lodo de perforación y crudos independientes del tiempo.	48
Tabla 6. Sistemas evaluados a diferentes temperaturas, velocidades angulares y concentraciones de diluyente.....	60
Tabla 7. Concentración volumétrica de crudo y diluyente mediante mezclas experimentales.....	61
Tabla 8. Lecturas Dial obtenidas a diferentes temperaturas y velocidades angulares con el viscosímetro de Fann 35A del crudo alfa.	66
Tabla 9. Lecturas de Dial obtenidas a diferentes temperaturas y velocidades angulares con el viscosímetro de Fann 35A.	69
Tabla 10. Parámetros reológicos del crudo Alfa y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de Bingham.	86
Tabla 11. Parámetros reológicos del crudo Alfa y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de ley de potencia.....	87
Tabla 12. Parámetros reológicos del crudo Alfa y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de Herschel-Bulkley.....	87
Tabla 13. Parámetros reológicos del crudo Omega y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de Bingham.....	90
Tabla 14. Parámetros reológicos del crudo Omega y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de ley de potencia.	91
Tabla 15. Parámetros reológicos del crudo Omega y sus mezclas con diluyentes, obtenidos por el modelo de Herschel-Bulkley.	91

Tabla 16. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones.	93
Tabla 17. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones	93
Tabla 18. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones	94
Tabla 19. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones	94
Tabla 20. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones	96
Tabla 21. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones.....	96
Tabla 22. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones.....	97
Tabla 23. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones.....	97

“EVALUACIÓN DE MODELOS REOLÓGICOS APLICADOS A CRUDOS PESADOS Y CON ADICIÓN DE DILUYENTES MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO”

Autores: Toledo Arízaga Carlos

Flores López Nexi

Tutor: Ing. Malavé Carrera Carlos

RESUMEN

Las altas viscosidades de los crudos pesados complican su gestión y transporte. La investigación examinó el efecto del destilado-1 y turbosina como diluyentes sobre la modificación del comportamiento reológico y la viscosidad del petróleo Alfa y Omega. Se prepararon mezclas con 5, 10 y 15% v/v de diluyente y se determinó experimentalmente la viscosidad dinámica aparente y esfuerzo cortante con respecto a la tasa de corte, a 60°C para el petróleo Alfa y 70°C para el petróleo Omega. Los datos se ajustaron a través de los modelos de Bingham, Power Law y Herschel-Bulkley, empleando la suma de residuos al cuadrado como criterio de comparación. Asimismo, la viscosidad de las mezclas se estimó con los modelos de Arrhenius y Grunberg-Nissan. Los resultados indicaron una disminución de la viscosidad al aumentar la concentración de diluyente y tasa de corte. Los índices de comportamiento de flujo fueron inferiores que la unidad, confirmando un comportamiento pseudoplástico de los sistemas evaluados. Herschel-Bulkley demostró el mejor ajuste al comportamiento reológico mientras que Grunberg-Nissan exhibió mayor capacidad predictiva de la viscosidad de las mezclas que Arrhenius. En conclusión, ambos diluyentes redujeron significativamente la viscosidad de los crudos estudiados, favoreciendo a mejorar su transportabilidad y sus condiciones de flujo.

PALABRAS CLAVE: VISCOSIDAD DINÁMICA, CRUDOS PESADOS, CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA, DIÉSEL-1 Y TURBOSINA.

“EVALUATION OF RHEOLOGICAL MODELS APPLIED TO HEAVY CRUDES AND DILUENT-BLENDED CRUDE VIA LABORATORY TESTS”

Autores: Toledo Arízaga Carlos

Flores López Nexi

Tutor: Ing. Malavé Carrera Carlos

ABSTRACT

The high viscosity of heavy crude oils complicates their handling and transport. This study examined the effect of Distillate-1 and jet fuel (turbosine) as diluents on the rheological behavior and viscosity of "Alfa" and "Omega" crude oils. Mixtures containing 5%, 10%, and 15% (v/v) diluent were prepared, and their apparent dynamic viscosity and shear stress were experimentally determined as a function of shear rate at 60°C for Alfa crude and 70°C for Omega crude. The data were fitted to the Bingham, Power Law, and Herschel-Bulkley models, using the sum of squared residuals as the comparison criterion. Additionally, mixture viscosity was estimated using the Arrhenius and Grunberg-Nissan models. The results showed a decrease in viscosity as diluent concentration and shear rate increased. Flow behavior *ÍNDICES* were less than unity, confirming pseudoplastic behavior in the systems evaluated. The Herschel-Bulkley model provided the best fit for the rheological behavior, while the Grunberg-Nissan model demonstrated greater predictive capability for mixture viscosity than the Arrhenius model. In conclusion, both diluents significantly reduced the viscosity of the crude oils studied, thereby improving their transportability and flow characteristics.

KEYWORDS: DYNAMIC VISCOSITY, HEAVY CRUDES, RHEOLOGICAL CHARACTERIZATION, DIÉSEL-1 AND JET FUEL.

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El petróleo crudo a nivel mundial es un recurso no renovable formado por una mezcla de hidrocarburos. Según Gomaa et al. (2024) el volumen de reservas totales probadas en todo el mundo a finales del año 2020 es de 1.732 billones bbl donde el 30% representa al petróleo convencional, 15% petróleo pesado, 25% petróleo extrapesado y el 30% arenas de petróleo y bitumen. Los derivados del petróleo crudo cumplen una función fundamental en diversos países que tienen la gran necesidad de su uso como combustible, los cuales son gasolina, Diésel-1, nafta, queroseno, GLP, fuel oil y entre otros, tanto para el funcionamiento de maquinaria industrial como el transporte o movilización vía marítima, terrestre y/o aérea. En este contexto, el petróleo y sus derivados cumple el rol de ser una fuente de energía para el crecimiento económico, productivo e industrial de un país. Sin embargo; en esta última década ha crecido exponencialmente la población mundial y por consiguiente una ascendente demanda del uso de petróleo crudo, y la gran cantidad de derivados que se ha logrado debido a su procedimiento de refinación; lo que ha llevado a cabo una disminución progresiva de las reservas de petróleo convencional concretamente de petróleo ligero y mediano, de modo que sea limitado y deficiente solventar el requerimiento cada vez superior de energía, por esta razón en las 2 últimas décadas el petróleo crudo no convencional está siendo visualizado como una fuente de energía alterna.

El manejo de petróleo se ha transformado en un procedimiento cada vez más técnico y complejo debido a las diversas propiedades del petróleo y los requisitos de la industria. No obstante, a diferencia de los bajos costos para producir el petróleo convencional, el petróleo no convencional específicamente petróleo pesado, extrapesado, bitumen y arenas; contienen una compleja composición y alta viscosidad causando que no pueda ser recuperado por métodos usuales de producción; lo que ha sido necesario implementar diversas estrategias viables como los sistemas de levantamiento artificial para garantizar su fluidez dentro de un caudal aceptable y movilidad eficiente por tubería de producción. A pesar de ello, se presentan desafíos complejos para transportar el petróleo no

convencional desde el cabezal de pozo hasta llegar a los centros de refinación; la razón principal es por su alta viscosidad, la cual se debe por un alto contenido de impurezas típicas de CO_2 y H_2O además de especies de alto peso molecular que particularmente son asfáltenos, waxes y resinas, y con ello provocando altas caídas de presión cuando se transporta por oleoductos de largas distancias, lo que conlleva a aumentar la potencia de las bombas siempre y cuando la presión de operación no supere la presión máxima de operación (MAOP). Sin embargo, esto ocasionaría el aumento de los costos de operación, y en consecuencia sea poco lucrativo o ineficiente.

De acuerdo al informe de Vera Grunauer (2021) en Ecuador gran parte de las reservas totales se encuentran en la región Amazónica con un 99.84%, la cual se separa en 2 grupos principales: el crudo del Oriente es considerado como el más cuantioso, produciendo en mayor proporción petróleo mediano con un API promedio ponderado de 25.5-26 y con un contenido de azufre de promedio 1.45% mientras que el crudo de Napo en gran parte produce petróleo pesado con un API promedio ponderado de 21.7-22.2 y con un contenido de azufre promedio de 2.10%. En menor medida la región litoral tiene 0.16% de las reservas totales y ha producido en mayor proporción petróleo con un API promedio ponderado de 38.6 38.7. La producción acumulada de la región Amazónica está constituida por un 67% de petróleo mediano y un 33% de petróleo pesado. El bloque 16 operado por la compañía Repsol Ecuador S.A., representa como uno de los principales productores de petróleo pesado con menor gravedad API de 15.6; por esta razón los crudos pesados de la región amazónica se caracterizan por exhibir altas viscosidades y por consecuente predominando un régimen de flujo laminar a través de los oleoductos y poliductos además de tener un comportamiento de fluido no newtoniano principalmente de tipo pseudoplástico, es decir, la viscosidad del petróleo pesado disminuye cuando se aplica un esfuerzo cortante mayor, alterando las condiciones de operación y pérdidas de presión a través de los oleoductos. Por tal motivo evaluar el comportamiento reológico del crudo pesado es necesario, debido a que relaciona como varía la viscosidad mediante la aplicación de una tasa de corte, esfuerzo y temperatura, para así interpretar su reacción bajo diferentes condiciones de operabilidad.

En ese marco, se han propuesto diferentes métodos para optimizar la movilidad del crudo pesado, entre las que más resaltan es el uso de la dilución, el calentamiento y emulsificación son algunos de esos métodos más comunes. El propósito de estas variantes es reducir de manera considerable la viscosidad y mejorar las condiciones de flujo para

su transporte en oleoducto y poliductos. Al trasladar el petróleo mediante tuberías, la viscosidad del crudo se ve en especial beneficiada en su reducción por la concentración de aditivos químicos y dilución con diluyentes o por el aumento de su temperatura anteriormente mencionados que también colaboran con la disminución de tensión artificial, formación de red viscoelástica por agregados de asfáltenos, punto de fluidez, punto de fluencia y área de cristales de waxes; sin embargo, la emulsión de aceite en agua aunque disminuye considerablemente la viscosidad del petróleo, según Palou et al. (2010), la restauración del petróleo original al romper la emulsión requiere procesos complejos además de seleccionar un surfactante óptimo debido a la composición de un petróleo específico. De acuerdo con A., I., & J. F. (2006), el calentamiento térmico del petróleo plantea limitaciones económicas por su proceso costoso de calentamiento especialmente en climas fríos. Por tal motivo la dilución con disolventes representa una aplicación conveniente, según Hu & Haoyang (2009) no altera las características originales del petróleo en contraste con el enfoque de emulsión además de ser aplicativo a cualquier condición climática mientras que el método térmico puede ser ineficiente en climas fríos (Luo, Yang, & Gu, 2007). Por esta razón surge la necesidad de evaluar el comportamiento reológico del petróleo pesado para obtener curvas de flujos de como varia la reducción de la viscosidad a diferentes tasas de corte, esfuerzo y temperatura, antes y después de añadir la dilución con diluyentes y con ello optimizando su operabilidad de transporte en oleoducto y poliductos.

1.2 ANTEDECENTES

Saeedi Dehaghani & Hasan Badizad (2016), realizaron un estudio sobre la reducción de la viscosidad de dos crudos pesados iraníes utilizando el método de dilución con diluyentes industriales y condensado de gas, demostraron que al mezclar con hexano y tolueno a bajas concentraciones tuvo más impacto en la reducción de la viscosidad que a altas concentraciones mientras que la mezcla con metanol ocasionó un aumento de la viscosidad debido a la formación de enlaces de hidrogeno además el condensado de gas tuvo mayor %DVR a temperaturas bajas, pero a altas su %DVR fue menor en comparación con otros diluyentes. Por otra parte, la nafta y el n-heptano tuvieron una reducción de viscosidad considerable. Aunque el presente estudio expone una caracterización experimental que presenta el efecto de la temperatura sobre la viscosidad del crudo pesado, su objetivo se delimita al presentar un análisis de las muestras antes de

incorporar procesos de dilución con los solventes que posteriormente se utilizarían en el experimento. De esta manera, el principal aporte del estudio se centra primordialmente en la variación de la viscosidad y no desarrolla una comparación exhaustiva entre los diferentes modelos reológicos que muestren con mayor precisión el comportamiento de los crudos pesados en condiciones reales de operación.

Faris et al. (2015), investigaron la influencia del tolueno y nafta como reductores de viscosidad y arrastre en el flujo de petróleo pesado iraquí a través de tuberías, los resultados indicaron que hubo una máxima reducción de arrastre de 40.48% y 34.32% al usar un 10 wt% de nafta y tolueno por una tubería de 0.0508 m de diámetro interno a una temperatura 27 °C. Aunque la presente investigación del estudio sí califica la eficacia del tolueno y la nafta para reducir considerablemente la viscosidad del crudo pesado, su análisis toma en cuenta algunas limitaciones, ya que se centra en la reducción de la viscosidad durante el transporte por tuberías y no considera precisamente una caracterización reológica integral del sistema. Por esta razón, el principal aporte de la investigación se enfoca en demostrar de manera experimental los diluyentes que fueron seleccionado en la reducción de viscosidad y su influencia de las pérdidas por fricción durante el transporte de crudos pesados.

P. Bassane et al. (2016), analizaron el efecto de la temperatura y la adición de condensado de gas sobre la viscosidad dinámica de 4 petróleos pesados de Brasil, los resultados demostraron que al aumentar la temperatura a 20 °C disminuyo la viscosidad dinámica entre 70 a 77% además que al añadir un 32% (v/v) de concentración de condensado de gas disminuyo la viscosidad dinámica en 98%. Sin embargo, con una concentración de 14% de condensado de gas disminuye la viscosidad dinámica un 90% y por lo tanto concluyeron que añadir mayor concentración por encima de esta puede ser innecesarias para alcanzar el objetivo deseado de reducir la viscosidad dinámica. El principal aporte del estudio aporta una evaluación comparativa entre diversos modelos de viscosidad de la mezcla, reconociendo que el modelo de Kendall-Monroe es la mejor opción durante el desarrollo del comportamiento observado en condiciones operativas y analizadas con respecto al resultado.

Mortazavi-Manesh & Shaw (2016), evaluaron el efecto de tres diluyentes n-heptano, tolueno y una mezcla de tolueno y butanona 50% (v/v) a diferentes concentraciones sobre las propiedades reológicas del crudo pesado Maya, y determinaron que la mezcla de

tolueno más butanona reducía la viscosidad con poca concentración, el efecto de reducción de viscosidad por la tasa de corte independiente de la temperatura, y además de disminuir el efecto tixotrópico. Aunque el trabajo desarrolla un profundo análisis sobre el comportamiento reológico del crudo Maya frente a diversos diluyentes, su alcance es exclusivo únicamente a un solo tipo de crudo, lo que obstaculiza extrapolar de manera directa los resultados a otros crudos pesados con distintas composiciones. Al final, el principal aporte demuestra que la eficacia de un diluyente para reducir la viscosidad de un crudo pesado va a depender de la composición química e interacción con los asfaltenos, más que únicamente de la proporción que desee emplearse.

Narro et al. (2020), efectuaron mezclas de petróleo pesado con diluyentes obtenidos de hidrocarburos líquidos obtenido de la pirolisis de polipropileno y poliestireno a diferentes concentraciones vol%; los experimentos lograron reducir la viscosidad hasta 96%-97% utilizando un 15 %vol con una viscosidad inferior a 400cp apto para el transporte por oleoductos a temperaturas relativamente bajas 45-65 °C. A diferencia de los anteriores estudios, este estudio se enfoca en hidrocarburos obtenidos a partir de polipropileno y poliestireno. Su evaluación muestra un enfoque muy favorable en cuanto a la reducción de viscosidad, además; la investigación contribuye un desarrollo importante de nuevos diluyentes.

Finalmente, el aporte de cada uno de los autores además de demostrar de manera experimental el estudio, proponen una nueva alternativa frente a los diluyentes convencionales, adicionando el aprovechamiento de residuos plásticos mediante la innovación de procesos de economía circular con las necesidades que presenta la industria petrolera.

Hasan et al. (2010), determinaron el comportamiento de la viscosidad al mezclarlo con petróleo liviano para disminuir la viscosidad con el fin de optimizar sus propiedades de flujo, consideraron varios factores como la tasa de corte, temperatura y la concentración del crudo liviano además de mediciones experimentales de tasa de corte, esfuerzo de corte y esfuerzo de fluencia sobre la mezcla petróleo pesado y liviano. Los resultados demostraron una disminución de 375 mPa·s a una temperatura ambiente de 25°C y que no requería esfuerzo de fluencia para la mezcla de crudo pesado-liviano.

Los autores al final aportan en presentar una revisión integral hacia las diferentes estrategias que se encuentran disponibles para disminuir la viscosidad de los crudos pesados. De esta manera, cada método está relacionado con el comportamiento reológico del petróleo y su impacto en el transporte por medio de tuberías.

Badalan et al. (2026), realizaron con muestras con crudo pesado del golfo de México evaluación reológica donde obtuvieron resultados de comportamiento no newtoniano dependiente de la temperatura, además desarrollaron una correlación exponencial para predecir las caídas de presión en oleoducto. Aunque la presente investigación tiene un enfoque experimental riguroso, se desarrolla correlaciones con un buen ajuste respecto a los datos obtenidos y, el análisis se limitará a un único crudo extrapesado del sur del Golfo de México, por lo que las ecuaciones sugeridas podrían no ser aplicables directamente a otros crudos con diferente contenido de asfalteno. El principal aporte que indican los autores se enfoca en aportar para que cada crudo altamente viscoso tenga una caracterización reológica, acompañada del desarrollo de múltiples correlaciones matemáticas capaces de predecir la viscosidad a diferentes condiciones de temperatura y velocidad de corte.

Ghannam et al. (2012), demostraron que a pequeñas fracciones de mezcla de crudo pesado con liviano de 10% a 20% reducía drásticamente la viscosidad y el yield point disminuyendo las dificultades de bombeo. Por esta razón, el estudio afirma que conforme aumenta el porcentaje de crudos ligeros, las mezclas presentarán una disminución progresiva, comportándose con una tendencia cercana de fluido newtoniano. Los autores también analizaron el comportamiento experimental para diferentes modelos reológicos, demostrando que los modelos no newtonianos se describen con mayor precisión.

Al final, principal aporte que tiene el estudio consiste en contribuir el trabajo al conocimiento del comportamiento no newtoniano de estas mezclas y evidencia la gran importancia de hacer un enfoque a los modelos reológicos adecuados para representar su comportamiento bajo diversas condiciones operativas.

Abarca et al. (2020), evaluaron el mejoramiento del perfil reológico cuando se diluye el crudo pesado con reductores a diferente ppm y demostraron la reducción de fricción en bombas de transferencia. El principal aporte de la investigación genera evidencia experimental acerca de las respuestas que tienen los crudos pesados en relación con la

incorporación de reductores de viscosidad, de esta manera contribuye a comprender las modificaciones de las propiedades de flujo de crudo.

Dong, et al. (2022), investigaron la adición de emulsiones en crudos pesados donde demostraron que la estabilidad de la muestra aumentaba con la adición de agua y por lo tanto una reducción de la viscosidad del 88.82%. Al final, el estudio aporta evidencia acerca del uso de emulsiones de APG08 como segura alternativa para disminuir la viscosidad del crudo que presente baja viscosidad mediante la formación de emulsiones estables.

Nikolaev et al. (2026), desarrollaron un modelo reológico-física que incorpora en la ecuación la concentración del diluyente al diluirlo en crudo pesado y la temperatura en el índice de consistencia y el índice de comportamiento de flujo. Determinaron que la dilución modifica la transición de comportamiento no newtoniano a newtoniano según cambian las condiciones térmicas. Finalmente, el aporte del estudio es el desarrollo de un modelo reológico basado en los principios físicos, capaz de mejorar la predicción del comportamiento de flujo durante las mezclas de crudos pesados y ligeros.

1.3 HIPÓTESIS

La elevación de la temperatura y el aumento de la concentración de 5, 10 y 15% v/v de turbosina y destilado 1 utilizados como diluyentes redujeron la viscosidad aparente y modificaron los parámetros reológicos del petróleo pesado, permitiendo describir matemáticamente su comportamiento mediante modelos reológicos de Bingham Plastic, Power Law y Herschel-Bulkley bajo a diferentes tasas de cortes y por lo tanto el esfuerzo cortante necesario para el flujo en oleoductos además de describir matemáticamente el comportamiento de la viscosidad de la mezcla del crudo pesado y diluyente mediante modelos matemáticos de mezcla de Arrhenius y Gruberg-Nissan.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo General

- Evaluar el comportamiento reológico de crudos pesados y con adición de diluyentes mediante ensayos experimentales de laboratorio, bajo diferentes condiciones de temperatura y tasa de corte.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar el comportamiento reológico de crudos pesados y con adición de diluyentes a partir de los datos experimentales obtenidos.
- Determinar la viscosidad dinámica de crudos pesados y con adición de diluyentes mediante ensayos de laboratorio a diferentes temperaturas y tasas de corte.
- Calcular la viscosidad de las mezclas de crudos pesados mediante modelos teóricos de mezclas con diluyentes.
- Comparar la viscosidad experimental con la viscosidad calculada mediante modelos teóricos de mezcla de crudos pesados con diluyentes.
- Identificar el modelo teórico de mezcla que presenta el mejor ajuste respecto a los datos experimentales obtenido.

1.5 ALCANCE

En el contexto nacional, este estudio presenta una amplia investigación acerca de cómo se comporta el crudo pesado con su condición inicial y después de la dilución con diluyentes, a presión ambiente constante y variando su temperatura; con el propósito de calcular su efecto en reducir la viscosidad y mejorar las condiciones operativas representativas de transporte a través de oleoductos.

El estudio se realiza en el laboratorio de mecánica de fluidos de la Universidad Península de Santa Elena (UPSE) mediante ensayos de laboratorio.

La población del presente estudio está integrada por 2 muestras de petróleo pesado con diferentes °API de la región amazónica ecuatoriana con el objetivo de analizar

experimentalmente la viscosidad dinámica y de sus mezclas con adición de diluyentes a diferentes proporciones, por consecuente, aplicando modelos de predicción de viscosidad de la mezcla a fin de compararlos con modelos teórico de mezclas, además de determinar su comportamiento reológico y parámetros reológicos a diferentes tasas de cortes y temperaturas; todo esto con la finalidad de realizar un análisis e interpretación de los resultados. Este estudio no incorpora caracterización físico química avanzada de crudos como S.A.R.A, composición detallada, precipitación de asfáltenos, simulación numérica, modelación CFD o estudios del transporte real mediante oleoductos, tampoco realiza evaluación económica, análisis costo operativos o estudios de optimización industrial o trabajos experimentales a condiciones extremas de presión o a escala de campo.

1.6 VARIABLES

1.6.1 Variables Dependientes:

- Viscosidad Aparente
- Esfuerzo Cortante
- Parámetro de modelos Reológicos

1.6.2 Variables Independientes

- Tasa de corte
- Temperatura de ensayo
- Tipo de muestra de crudo
- Concentración del diluyente
- Velocidad Angular

CAPITULO II: MARCO TEORICO

2.1 PETRÓLEO CRUDO

2.1.1 Clasificación del petróleo

La gravedad API (*American Petroleum Institute*) es un indicador empleado para calcular la densidad del petróleo en relación con la densidad del agua, clasificando de esta manera qué tan pesado o liviano puede lograr ser el petróleo. De esta manera, es una medida importante dentro de la industria petrolera que ayuda a determinar el procesamiento y valor comercial a nivel mundial.

A continuación, se mostrará según este criterio cómo se clasifica el petróleo en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del petróleo mediante criterios seleccionados y características de flujo.

CLASIFICACIÓN	DENSIDAD (G/CM3)	GRAVEDAD (°API)	CARACTERÍSTICAS DE FLUJO
Liviano	0.87-0.83	>31.1°	Flujo moderado
Medio	0.92-0.87	22.3°-31.1°	Flujo aceptable
Pesado	1.00-0.92	10°-22.3°	Flujo limitado
Extrapesado	>1.00	<10°	Se necesita un esfuerzo determinado para que fluya.

Fuente: Adaptado de AI Regula Solutions (2025)

- **Petróleo liviano:** Considerado por tener una alta fluidez en los procesos de transporte y caracterizado por su bajo contenido de densidad y viscosidad.
- **Petróleo medio:** Caracterizado por tener una composición intermedia de concentración de hidrocarburos y peso molecular, lo que le da un flujo aceptable que puede ser transportado sin mayor dificultad.

- **Petróleo pesado:** Considerado por tener poca fluidez y alta viscosidad como consecuencia que durante el proceso de refinación suele ser más costoso y complicado.
- **Petróleo extrapesado:** Considerado por tener una menor cantidad de concentración de hidrocarburos y mayor cantidad de viscosidad lo que complica su movilización. Para su manejo se necesitará técnicas de extracción mejorada, como la inyección de vapor o diluyentes, para su transporte y procesamiento.

2.1.2 Propiedades fisicoquímicas del petróleo

Cada clasificación de petróleo presenta únicas propiedades físicas y químicas que se identifican por su: olor, color, densidad, sabor, índice de refracción, coeficiente de expansión, punto de ebullición, punto de congelación, punto de deflagración, punto de quema, poder calorífico, calor latente de vaporización y viscosidad. (EP Petroecuador, 2013)

(Giraldo, et al. 2011) manifiestan que, en relación con un derivado de petróleo; el bioDiésel-1, presenta una relación con propiedades físicas y comportamientos químicos; entre las propiedades físicas se menciona la densidad, viscosidad, número de cetano, punto de fulgor, punto de fluidez, y entre otras; dentro de la composición química tendrá relevancia la polaridad y reactividad.

Si bien el presente estudio es específico para propiedades fisicoquímicas del petróleo, muchas propiedades anteriormente mencionadas como la viscosidad, densidad y número de cetano también se utilizan en caracterización de biocombustibles como el bioDiésel-1, por lo que se estableció criterios comparativos a nivel de comportamiento y calidad.

En general, todas las propiedades permiten optimizar futuros procesos posteriores después de la extracción, controlando la calidad de los combustibles derivados del petróleo crudo.

2.2 CRUDOS PESADOS

2.2.1 Características de los crudos pesados

La característica general de los diversos tipos de clasificación que existe de los crudos radica principalmente en su capacidad de flujo y viscosidad en un determinado tiempo y cómo es representada de manera indirecta por la densidad o gravedad específica. En otros términos, (Gomaa, et al. 2024) mencionan que, en relación con la viscosidad, estos crudos pesados poseen valores que oscilan entre 100 a 10.000cp, lo que muestra que son muy viscosos y presentan un flujo limitado. Esta elevada viscosidad presenta complicaciones durante su desplazamiento tanto en el medio poroso del yacimiento y así mismo en el transcurso de su ascenso por el pozo, lo que dificulta completamente su proceso de producción. Sumado a esto, (Rojas & Castillo, 2017) explican que otras características de los crudos pesado, es que presentan un alto porcentaje de azufre, al ser densos y viscosos, estos crudos no presentaron el mismo proceso de alteración térmica a diferencia de los crudos ligeros. Por lo tanto, para hacerlos más fluidos y manejables se requieren calentamiento, surfactantes, dilución con diluyentes y entre otros métodos.

Todas estas características implican que durante su proceso de refinación necesitan métodos y tratamientos específicos para optimizar su calidad y lograr los resultados buscados durante la etapa de comercialización. Para aumentar el logro de estos productos comerciales, es necesario incorporar etapas adicionales de limpieza, desulfuración y refinación para que finalmente cumplan con las especificaciones del mercado.

2.2.2 Composición química

El petróleo es una mezcla muy compleja que contiene en mayores concentraciones moléculas con átomos de carbono e hidrogeno y compuestos tales como azufre, nitrógeno, oxígeno y concentraciones muy bajas de compuestos metálicos. (Cámara Argentina de Laboratorios Independientes, Bromatológicos Ambientales y Afines (CALIBA), 2014)

(Schumberger, s.f) menciona que la característica principal del petróleo crudo se basa en un sistema que separa el petróleo crudo y sus derivados en 4 fracciones según su polaridad y solubilidad: SARA (Saturados, Aromáticos, Resinas y Asfaltenos). El

fragmento saturados y aromáticos conciernen a componentes más ligeros y menos polares; sin embargo, las resinas y los asfaltenos pertenecen a componentes más pesados y menos polares.

(Stratiev, et al. 2019) describen la unión de saturados, aromáticos y resinas se denominan maltenos, que forman parte de la fase continua de los asfaltenos. En esta situación, quienes cumplen un rol muy importante en estabilizar principalmente a los asfaltenos en el crudo son las resinas, evitando la precipitación y floculación de este. El volumen de resinas asociadas a los asfaltenos va a depender en gran proporción del tipo de solvente que se esté utilizando, principalmente del alcano precipitante, lo cual de manera directa influirá en la estabilidad del sistema.

En resumen, la composición química del petróleo investigada por el análisis SARA, las resinas juegan un papel muy importante al actuar como agentes estabilizantes de los asfaltenos. Por ende, el análisis de la composición permite detallar un proceso químico y explicar cómo es el comportamiento durante las etapas de producción, transporte y refinación, especialmente en crudos pesados y extrapesados.

2.3 FUNDAMENTOS DE REOLOGIA

2.3.1 Concepto de reología

Según (Barnes, et al. 1989) la reología es la rama de la física que estudia cómo se comporta y se deforma el flujo de un fluido cuando se aplica una acción de esfuerzos, donde incorpora la viscosidad y la elasticidad, la combinación de estas propiedades se llama “viscoelasticidad” y su objetivo es describir cómo es su comportamiento bajo variables significativas como esfuerzo, deformación, tasa de corte y temperatura con respecto al tiempo. De esta manera la reología se ocupa específicamente para materiales complejos como suspensiones, lodos, asfaltos, bitúmenes y crudos pesados, los cuales no podrían describirse mediante modelos lineales simples.

Por este motivo, la reología se considera una rama fundamental de la ciencia, física e ingeniería porque permite clasificar y comprender fluidos según su naturaleza o estructura, así mismo como su comportamiento reológico.

2.3.2 Concepto de fluido

Powers (2023), define como una sustancia que no mantiene su forma fija cuando se actúa sobre ella un esfuerzo cortante, por lo tanto, deformándose de manera continua y cada vez más en el transcurso del tiempo hasta que deje de aplicarse aquel esfuerzo.

2.3.3 Esfuerzo cortante

State (2004), lo define como la fuerza paralela que se aplica sobre un elemento superficial en una unidad de área.

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1)$$

τ = *esfuerzo cortante*

F = *fuerza tangencial aplicada*

A = *área sobre la cual actúa la fuerza*

2.3.4 Tasa de corte

(Triantafillopoulos, 2000), definió como la velocidad con la que se deforman las capas del fluido una con respecto a otras. En un flujo producido por un esfuerzo cortante la capa superficial adyacente se desplazará con mayor velocidad que las capas más alejadas y así ocasionando un gradiente de velocidad o también llamado tasa de corte.

$$\dot{\gamma} = \frac{V}{h} \quad (2)$$

$\dot{\gamma}$ = *tasa de corte*

V = *velocidad relativa entre capas o placas*

h = *distancia entre las capas o placa*

2.3.5 Viscosidad aparente

H et al. (2014), definieron como la relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte, la viscosidad aparente varía dependiendo de la tasa de corte y esfuerzo que se aplique a una determinada temperatura para fluidos no newtonianos, mientras que para

fluidos newtonianos la viscosidad es absoluta y la misma independientemente de la variación de la tasa de corte o del esfuerzo cortante.

$$\mu_{ap} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

μ_{ap} = viscosidad aparente

$\dot{\gamma}$ = tasa de corte

τ = esfuerzo cortante

2.3.6 Reología de crudos pesados

Desde el punto de vista reológico, (Alcántara, 2023) menciona que los crudos que presentan alta viscosidad y poca fluidez suelen comportarse como fluidos no newtonianos, lo que dificulta su movilidad y presenta mayores costos y desafíos operativos, ya que su viscosidad no pertenece constante, sino que cambia en función a la velocidad de corte y en muchos casos también con respecto al tiempo. Este comportamiento vincula con la presencia de resinas y asfáltenos, los cuales influyen en la formación de estructuras internas que afectan al fluido.

Por otra parte, (Barnes, et al. 1989) definen la curva de flujo como una relación entre el esfuerzo cortante y la tasa de deformación que se emplea en la caracterización reológica. Los autores también definen 3 tipos de comportamientos reológicos: pseudoplásticos, dilatantes y viscoelásticos. En consecuencia, muchos de los crudos pueden presentar comportamiento tixotrópico bajo ciertas condiciones, donde disminuirá la viscosidad al aplicar una fuerza externa y se recuperará con el reposo.

En el ámbito de la industria petrolera, los fluidos que presentan diferentes comportamientos reológicos según su composición química, temperatura y condiciones de flujos son fluidos newtonianos y no newtonianos, cada uno de ellos presenta diferentes criterios de clasificación. Para clasificar estos fluidos, se considerará la forma en que responden al aplicarles una tensión.

a) *Fluidos newtonianos*: se considera un fluido newtoniano aquel fluido que presente una viscosidad constante con respecto a cualquier tasa de corte aplicada.

b) *Fluidos no newtonianos*: (Fisher Scientific, 2023) menciona que un fluido no newtoniano es aquel fluido que presenta una viscosidad no constante con respecto a cualquier tasa de corte; es decir, que muestran propiedades viscoelásticas, lo que significa que su viscosidad y elasticidad varían en función de una temperatura y fuerza aplicada. Los fluidos no newtonianos, se pueden agrupar en 4 grandes grupos.

- **Dilatantes**: (Aulton, 2004) menciona que son aquellos fluidos que, al aumentar la velocidad de cizallamiento provoca que incrementen su viscosidad.
- **Pseudoplásticos**: (Aulton, 2004) menciona que son aquellos fluidos que, al aumentar la velocidad de cizallamiento provoca que disminuya su viscosidad.
- **Tixotrópicos**: según (Barnes H. , 1997) menciona que la tixotropía es un comportamiento del fluido donde la viscosidad tiende a disminuir cuando se aplican esfuerzos cortantes y se recupera cuando el material se encuentra en reposo.
- **Reopéticos**: según (Oates, et al. 2005) mencionan que este tipo de fluido aumenta la viscosidad conforme incrementa el tiempo cuando se someten a un esfuerzo de cizallamiento. A diferencia de otros fluidos, los fluidos reopéticos al someterse a un esfuerzo de cizallamiento, se vuelve una viscosidad que presenta poca fluidez; es decir, que con el paso del tiempo este fluido se vuelve más sólido. Aunque ambos fluidos no newtonianos son dependientes del tiempo, los fluidos tixotrópicos y reopéticos son fenómenos opuestos que de manera conjunta nos ayuda a comprender la evaluación estructural de los fluidos bajo esfuerzo de cizalla.
- **Viscoelásticos**: (García & Saraji, 2019) destacan que los fluidos viscoelásticos responden de manera tanto viscosa como elástica por lo que el fluido puede comportarse como un sólido o fluido dependiendo de factores como el tiempo y la deformación, lo que genera fenómenos complejos en condiciones de flujos.

2.3.7 Factores que afectan la viscosidad

El autor (Speigth, 2014) menciona que los tratamientos y la producción de crudos pesados resultan de altos costos operativos debido a su alta viscosidad, por lo que será importante identificar los diferentes tipos de métodos de cuantificación de la viscosidad y los factores que influyen en ella. De esta manera, (Guo, et al. 2007) apoyan que el factor principal que afecta la viscosidad es la temperatura y es controlada en procesos de upstream y downstream. Sin embargo, la temperatura no es el único factor que afecta la viscosidad, sino también la composición química, contenido de agua y la formación de emulsiones son otros factores que afectan de manera directa la viscosidad. A continuación, factores que afectan la viscosidad:

- a) *Influencia de la temperatura en la viscosidad de crudos pesados:* diversos estudios sobre crudos pesados, como el de (Alomair, et al. 2016) mencionan que la viscosidad es una propiedad muy sensible a la temperatura, debido a que, con el calor las moléculas cambian y alteran drásticamente las fuerzas intermoleculares, mostrando una relación no lineal entre la temperatura y la viscosidad. De esta manera, los autores buscan analizar la relación de estas propiedades y proponen diversos modelos predictivos que se basan en correlaciones empíricas, entre ellas: correlaciones doble logarítmicas que son muy usadas en crudos pesados y además mejoran el ajuste cuando la viscosidad varía mucho, también se menciona la dependencia con la temperatura y finalmente con la dependencia con API que actúa como parámetro de ajuste del modelo. El trabajo concluye que la temperatura es la variable que más influye y al mismo tiempo que más afecta en crudos pesados para términos de producción y manejo.
- b) *Efectos de la composición química del crudo:* el estudio de (Marín Velásquez, 2020) propone un modelo matemático que permite estimar la viscosidad del crudo, de manera práctica, el estudio hace un enfoque operacional a crudos medianos del estado Monagas, Venezuela para analizar las propiedades más importantes como la gravedad °API y temperatura, para que después se ajuste un modelo matemático y finalmente valide el modelo haciendo una comparación con los datos experimentales. En este contexto, el trabajo demuestra que la viscosidad va a depender de las propiedades que estén ligadas a la composición del crudo y que la viscosidad puede modelarse matemáticamente. De la misma manera,

(Anton Paar México, S.A. de C.V., 2020) dentro de la composición química del crudo SARA, el autor menciona que el gran contenido de asfaltenos y waxes afecta de manera considerable la viscosidad, los cuales incrementan la resistencia al flujo. Sin embargo, los asfaltenos tienen a aglomerarse y formar micelas, a diferencia de las resinas, (Remolina-Campos, et al. 2019) menciona que las resinas rodean a los asfaltenos por efectos estéricos, evitando su superposición y aglomeración excesiva, lo que ayuda a mantener o reducir su viscosidad.

c) *Impacto de contenido de agua y emulsiones:* la presencia de agua en crudos pesados y la estructura de las emulsiones no solo afectan drásticamente en la viscosidad, mencionan (Farah, et al. 2005) sino también que influyen en el comportamiento reológico del crudo, por lo que dificulta el movimiento del fluido. En este contexto, el crudo será la fase continua por lo que el agua estará dispersa en forma de microgotas y estas microgotas estarán cubiertas por asfaltenos, resinas y compuestos polares en la cual actúan como emulsificantes naturales. De esta manera, los siguientes estudios (Farah, et al, 2005) (Wong, et al. 2015) reportan que a medida que aumenta la fracción volumétrica del agua, se presentará un aumento de viscosidad de la emulsión, por ejemplo, en el estudio publicado por (Farah, et al 2005) mencionan que este contenido puede superar hasta 60% en volumen de agua. Por lo tanto, distintos autores coinciden que a tales concentraciones puede ocurrir fenómenos de coalescencia y cambios en la estructura de la emulsión que modifican la viscosidad del sistema. Finalmente, ambos estudios concluyeron que el efecto del agua sobre la viscosidad del crudo está estrechamente relacionado con la dinámica de las emulsiones y las interacciones fisicoquímicas entre sus componentes.

2.4 REDUCCIÓN DE VISCOSIDAD DEL CRUDO

El crudo pesado se caracteriza por tener poca fluidez y baja movilidad con respecto al tiempo, es decir una viscosidad alta, para ellos la reducción de viscosidad del crudo es importante porque permite facilitar su transporte, procesamiento, especialmente en petróleo que estén en un rango de 10-22.3° API o <10° API. El estudio que presentan (Abarca, et al. 2020) mencionan que como estrategia para mejorar las propiedades reológicas de crudos pesados se aplican aditivos químicos que cumplen con el propósito y además de eso aporta la reducción de viscosidad e impide la deposición de sólidos.

Además, el estudio integra ensayos experimentales en laboratorio con pruebas de campos y los resultados corroboraron una efectividad de los aditivos alcanzando una reducción de viscosidad de hasta un 28% bajo condiciones específicas de operación. De esta manera, el estudio comprueba que de manera técnica el uso de aditivos químicos constituye una alternativa operacionalmente efectiva para el manejo de crudos pesados.

Existen diversos métodos para obtener una reducción de viscosidad del crudo, los cuales se presentan como: métodos tradicionales y métodos químicos.

2.4.1 Métodos tradicionales

Uno de los métodos más conocidos que permite aumentar su movilidad sin alterar de manera significativa su composición química, son los métodos tradicionales. Dentro de este grupo, las técnicas más representativas en la práctica industrial es el calentamiento y la dilución.

a) Calentamiento: según (Zhu, et al. 2015) el calentamiento constituye el método tradicional más eficaz para lograr una reducción considerable del crudo pesado. El método consiste en aumentar la temperatura del fluido para debilitar sus enlaces intermoleculares y de esta manera reducir la resistencia del flujo. No obstante, el estudio evidencia que este método de calentamiento, aunque es el más eficaz de los métodos tradicionales, puede presentar limitaciones, por lo que se ha considerado combinar técnicas de dilución para mejorar su efectividad.

b) Dilución: en el siguiente estudio (Saeedi Dehaghani & Hasan Badizad, 2016) mencionan que la dilución es otro método tradicional que consiste mezclar un fluido de alta viscosidad con hidrocarburos que presenten mejor movilidad para reducir la viscosidad del crudo pesado y de esta manera optimizar su fluidez. La presencia de tolueno y otros solventes aromáticos como n-heptano, metanol, gas

condensado y nafta presentan mayor capacidad de interacción con los asfaltenos, favoreciendo la disminución de la viscosidad del sistema.

2.4.2 Métodos químicos

a) *Diluyentes*: de acuerdo con el enfoque de (Gary & Handwerk, 1975), los diluyentes son generalmente hidrocarburos livianos que pueden provenir durante la etapa física de destilación o corrientes naturales, y su principal característica es que poseen baja viscosidad y alta volatilidad que se mezclan con crudos pesados con el objetivo de mejorar las propiedades del flujo y de esta manera reducir la viscosidad de sustancias más espesas. En el presente estudio, durante el laboratorio de la Universidad Estatal península de Santa Elena (UPSE) se ha propuesto dar énfasis a 2 diluyentes que presentan como propósito reducir la viscosidad de crudos pesados de la Amazonía del Ecuador con diferentes muestras de °API de 18° y 22.3°, los diluyentes a utilizar fueron: turbosina y destilado 1. Desde el punto de vista químico, según el estudio de (Benavides, et al. 2021), la turbosina (Jet A-1, JP-8) es una mezcla compleja de hidrocarburos líquidos estructurada por: parafinas, naftenos y aromáticos, derivados del proceso físico de destilación fraccionada anteriormente mencionada. Sus principales características es tener un alto poder calorífico, baja viscosidad y un punto de congelación extremadamente bajo. (Shell, 2025) Por otra parte, a pesar de que la turbosina es un derivado del petróleo y tiene propiedades solventes, no es un diluyente comercial estándar; sin embargo, debido a su baja viscosidad y composición química, la turbosina puede tener la capacidad de diluir y cumplir el objetivo en la reducción de viscosidad de crudos altamente pesados disminuyendo las interacciones moleculares dando como resultado una menor resistencia al flujo. Finalmente, las fracciones obtenidas por destilación es otro método químico que reduce la viscosidad, de esta manera (Speigth, 2014) menciona que estas fracciones son aquellas que se obtienen durante los procesos fraccionarios de destilación y se caracterizan por presentar menor viscosidad y peso molecular, lo que permite disminuir la resistencia de flujo cuando se combina con el crudo.

b) *Surfactantes*: el siguiente estudio (Hu, et al. 2021) está enfocado en la recuperación mejorada de petróleo (EOR), en mejorar las propiedades de flujo y en la reducción de viscosidad y control de movilidad. De esta manera, los autores

señalan uno de los métodos para reducir la viscosidad son los surfactantes y explican que estos son una sustancia química que tiene como objetivo disminuir la tensión interfacial entre el agua y crudo lo que permite una mejor dispersión de fases, además de la estabilidad de las emulsiones. Al final, el estudio hace énfasis en que el sistema presenta un comportamiento no newtoniano; en la que la viscosidad va a depender del esfuerzo de corte y los autores establecen criterios comparativos entre los diluyentes y surfactantes; aclaran que la diferencia radica en que los diluyentes actúan por mezcla y requieren grandes volúmenes mientras a diferencia que los surfactantes actúan a nivel molecular y no se requiere gran cantidad, enfatizando que la adición de surfactantes puede ser más eficiente. En este sentido, aunque los surfactantes modifican la microestructura del sistema, también contribuyen a reducir la resistencia al flujo bajo condiciones dinámicas.

2.4.3 Influencia del contenido de agua

De acuerdo con el siguiente estudio, (de Oliveira, et al. 2018) los autores analizan la relación entre viscosidad aparente y el tipo de emulsiones, haciendo énfasis cómo el contenido de agua afecta la viscosidad en crudos pesados. Dentro de este estudio, los autores demuestran de manera experimental que el comportamiento reológico no tendrá una tendencia lineal, sino que va a depender de la microestructura generada por la dispersión de las fases; de esta manera, se realizó una preparación de emulsiones a base de crudo pesado y diferentes porcentajes de agua para ver el efecto entre: contenido de agua, salinidad y pH, lo que les permitió observar cómo cambia el sistema completo. Los autores observaron que a bajo contenido de agua la fase continua es el aceite y se da una emulsión de tipo W/O lo que presenta una alta viscosidad y a un alto contenido de agua la fase continua pasa a ser el agua y se da una emulsión de tipo O/W lo que resulta una baja viscosidad, el detalle importante es que este cambio no ocurre exactamente en un porcentaje fijo, sino que depende del tipo de crudo, asfaltenos, salinidad y la temperatura.

En este contexto, los autores concluyen que la viscosidad no solamente va a depender del contenido del agua; sino también que va a depender del tamaño de gota y estabilidad de la emulsión, evidenciando que el control de estas variables es importante para optimizar el flujo durante el transporte de crudos pesados.

2.4.4 Viscosímetro rotacional de Fann 35A

El viscosímetro rotacional es un instrumento usado en la industria petrolera como una técnica experimental para determinar la reacción de un fluido cuando este se somete a una deformación por esfuerzo cortante, el equipo se muestra en la Figura 1. El funcionamiento consiste en colocar el fluido entre dos superficies con forma cilíndrica concéntricas, en la cual el cilindro exterior gira a una velocidad angular conocida mientras que el cilindro interior registra la fuerza de resistencia que el fluido opone al fluir por ende girando contrariamente al flujo y así transmitiendo esta resistencia a un resorte que está conectado a un dial que se deflacta desde cero grados de deformación hasta n grados de deformación, dependiendo así del equipo a utilizar, y que mediante fórmulas se puede convertir en esfuerzo cortante, tasa de corte, viscosidad aparente y entre otras.

El viscosímetro rotacional de Fann35A es de funcionamiento tipo Coutte, el cual está formado por un cilindro exterior giratorio llamado rotor y un cilindro interior nombrado Bob. El fluido se coloca en el espacio anular que se forma entre el Bob y el rotor, al iniciar el funcionamiento del rotor exterior, el fluido opondrá una resistencia a fluir y por lo tanto transmitiendo este arrastre sobre el Bob que por consiguiente girará en sentido contrario y así produciendo un torque que se traslada a un resorte de precisión y aquello mostrándose como una deflexión angular del dial.



Figura 1. Viscosímetro rotacional Fann modelo 35 A usado para realizar ensayos reológicos
Fuente: Adaptado de (Fann , 2016)

El viscosímetro de Fann 35A se basa en el principio físico de torque y esfuerzo cortante, relacionándolo con la deformación del resorte del viscosímetro producto de la resistencia del fluido a fluir se obtiene la siguiente ecuación:

$$T = k \cdot \theta \quad (4)$$

$T = \text{torque}$

$k = \text{constante de torsion del resorte}$

$\theta = \text{grados de deflexión del dial}$

2.4.5 Ecuaciones para un fluido newtoniano del viscosímetro rotacional de Fann 35 A

El equipo está diseñado para evaluar propiedades reológicas tanto para fluidos newtonianos como fluidos no newtonianos, utilizando una combinación estándar con geometría de Bob B1, rotor R1 y un resorte F1 además de ofrecer velocidades angulares específicas de 3, 6, 100, 200, 300, 600 rpm las cuales se pueden transformar mediante fórmulas o ecuaciones de conversión que ofrece el equipo a variables reológicas. Para la combinación de geometría R1-B1 las dimensiones son:

$$r_{bob} = 1.7245 \text{ cm}$$

$$r_{rotor} = 1.8415 \text{ cm}$$

$$h_{bob} = 3.8 \text{ cm}$$

$$h_e = 0.2555 \text{ cm}$$

$$k = 387 \frac{\text{dyn} \cdot \text{cm}}{\text{degree deflection}}$$

Aquellas dimensiones son primordiales en la simplificación de ecuaciones generales del viscosímetro para un fluido newtoniano y así encontrar las variables reológicas cuando se tiene una configuración R1-B1.

La ecuación general del esfuerzo cortante:

$$\tau = \frac{k \cdot \theta}{2 \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot (h_{bob} + h_e)} \left[\frac{\text{dyn}}{\text{cm}^2} \right] \quad (5)$$

La ecuación general de la viscosidad aparente:

$$\mu_a = \frac{1500 \cdot k \cdot \theta}{2 \cdot \pi^2 \cdot (h + h_e) \cdot f} \cdot \left[\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right] [cp] \quad (6)$$

La ecuación general de la tasa de corte:

$$\dot{\gamma} = \frac{\pi \cdot f}{15 \cdot \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \right]} \left[\frac{1}{s} \right] \quad (7)$$

En la Tabla 2 se presenta ecuaciones de las variables reológicas del viscosímetro de Fann 35A transformadas a diferentes unidades para un fluido newtoniano y con una configuración R1-B1

Tabla 2. Ecuaciones de las variables reológicas del viscosímetro de Fann 35A.

Variables	Unidades de campo	Unidades anglosajonas	Unidades del SI
Esfuerzo cortante	$\tau = 5.109 \cdot \theta \left[\frac{dyn}{cm^2} \right]$	$\tau = 1.067 \cdot \theta \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right]$	$\tau = 0.5109 \cdot \theta [Pa]$
Viscosidad Aparente	$\mu = 300 \cdot \frac{\theta}{f} [cp]$	$\mu = 0.6265 \cdot \frac{\theta}{f} \left[\frac{lbf \cdot s}{100 \cdot ft^2} \right]$	$\mu = 0.03 \cdot \frac{\theta}{f} \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right]$
Tasa de corte	$\dot{\gamma} = 1.703 \cdot f \left[\frac{1}{s} \right]$		

Fuente: Adaptado de Morales Salazar (2024).

Nota. Las ecuaciones simplificadas solo se considera para la combinación geométricas de R1-B1.

2.4.6 Ecuaciones para un fluido no newtoniano en flujo plástico del viscosímetro rotacional de Fann 35A

Los fluidos no newtonianos con un comportamiento plástico presentan un esfuerzo inicial a superar para comenzar a fluir; este se conoce como esfuerzo cedente, yield point o punto cedente, el cual agrega a la ecuación del modelo newtoniano la variable yield point y modifica la viscosidad aparente a viscosidad plástica debido a que ahora la pendiente de la recta que relaciona el esfuerzo cortante y tasa de corte ya no pasa por el origen. En la Tabla 3, se presenta una comparación de las ecuaciones, en el que se puede observar la modificación y agregación de las nuevas variables reológicas.

Tabla 3. Comparación del modelo newtoniano y no newtoniano con flujo plástico.

Modelo no newtoniano con flujo plástico	Modelo Newtoniano
$\tau = \tau_y + \mu_p \cdot \dot{\gamma}$	$\tau = \mu_a \cdot \dot{\gamma}$

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 3 se puede definir los parámetros y variables del modelo de fluido no newtoniano con flujo plástico, las cuales son:

El esfuerzo cortante para un fluido plástico se asocia a la resistencia viscosa en el transcurso del flujo

$$\tau = 1.067 \cdot \frac{\mu_p}{A} \cdot f + \tau_y \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right] \quad (8)$$

La viscosidad plástica μ_p demuestra que es la pendiente de la relación entre esfuerzo cortante y tasa corte luego que el fluido ha vencido el esfuerzo cedente.

$$\mu_p = \frac{A}{100} \cdot \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{f_2 - f_1} \right) \left[\frac{dyn \cdot s}{cm^2} \right] \text{ ó } [poise] \quad (9)$$

El esfuerzo cedente o yield point τ_y define esfuerzo más bajo que se debe aplicar al fluido para iniciar su movimiento

$$\tau_y = \frac{A}{B} \left(\theta_1 - \left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{f_2 - f_1} \right) \cdot f_1 \right) \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right] \quad (10)$$

$$\tau_y \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right] = \theta_y \text{ [grados de deflexión]}$$

La tasa de corte para un fluido plástico $\dot{\gamma}_p$ representa la tasa de deformación que considera la tasa de corte para un fluido newtoniano $\dot{\gamma}_n$ y además la tasa de corte que se produce en un fluido en específico al tener un esfuerzo mínimo para fluir $\dot{\gamma}_y$, siendo esta una corrección constante, sin embargo, en la práctica de análisis de modelos reológico normalmente se usa la tasa de corte para fluido newtoniano $\dot{\gamma}_n$ con un acortamiento matemático que ocasiona no utilizar $\dot{\gamma}_p$ y dando así los mismo resultados, esto se realiza debido a la complejidad que conlleva resolver la tasa de corte para fluidos no newtonianos el cual requiere resolver una integral que no tiene solución analítica y por lo tanto necesita el uso de métodos numérico para aproximar.

$$\dot{\gamma}_p = 1.703 \cdot f + \frac{1.703A}{1.067} \cdot \tau_y \cdot (1.067 - 1) \left[\frac{1}{s} \right] \quad (11)$$

Las constantes geométricas son valores constantes que se obtienen de las dimensiones de radio del Bob y rotor a utilizar, por lo tanto, para una configuración de R1 Y B1 del viscosímetro de Fann35A:

$$A = \left(\frac{k}{4 \cdot \pi \cdot h \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{60} \right)} \cdot \left[\frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right] \right) (100) \left[\frac{cP \cdot rpm}{[grados de deflexion]} \right] \quad (12)$$

$$B = \left(\frac{1}{\left(\frac{2 \cdot \pi}{60} \right)} \cdot \left[\ln \frac{r_2}{r_1} \right] \right) \cdot (100) \left[\frac{cP \cdot rpm}{\frac{lbf}{100 \cdot ft^2}} \right] \quad (13)$$

En la Tabla 4 se presenta ecuaciones de los parámetros y variables reológicas del viscosímetro de Fann 35A transformadas a diferentes unidades para un fluido no newtoniano y con una configuración R1-B1.

Tabla 4. Expresiones matemáticas a diferentes unidades de variables empleadas.

Variables	Unidades de campo	Unidades anglosajonas	Unidades del SI
Esfuerzo cortante	$\tau = 4.7882 \cdot \left(\tau \left(\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right) \right) \left[\frac{dyn}{cm^2} \right]$	$\tau = \frac{\mu_p}{478.82} \cdot \dot{\gamma}_p + \tau_y \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right]$	$\tau = 0.47882 \cdot \left(\tau \left(\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right) \right) [Pa]$
Viscosidad Plástica	$\mu_p = \frac{(\mu_p [cp])}{100} \left[\frac{dyn \cdot s}{cm^2} \right] \text{ ó } [Poise]$ $\mu_p = \theta_{600} - \theta_{300} [cP]$	$\mu_p = \frac{(\mu_p [cp])}{478.82} \left[\frac{lbf \cdot s}{100 \cdot ft^2} \right]$	$\mu_p = \frac{(\mu_p [cp])}{1000} \left[\frac{N \cdot s}{m^2} \right] \text{ ó } [Pa \cdot s]$
Tasa de corte plástica	$\dot{\gamma}_p = 1.703 \cdot f + \frac{1.703A}{1.067} \cdot \tau_y \cdot (1.067 - 1) \left[\frac{1}{s} \right]$		
Punto cedente	$\tau_y = 4.7882 \cdot \left(\tau_y \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right] \right) \left[\frac{dyn}{cm^2} \right]$	$\tau_y = 2\theta_{300} - \theta_{600}$ $\tau_y = \theta_{300} - \mu_p([cP]) \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right]$	$\tau_y = 0.47882 \cdot \left(\tau_y \left[\frac{lbf}{100 \cdot ft^2} \right] \right) [Pa]$
Constantes geométricas	$A = 300 \left[\frac{cP \cdot rpm}{\text{grados de deflexion}} \right]$ $B = 300 \left[\frac{cPrpm}{\frac{lbf}{100ft^2}} \right]$		

Fuente: Adaptado de Morales Salazar (2024).

Nota. Ecuaciones simplificadas obtenidas de la configuración geométrica R1-B1 del viscosímetro de Fann 35A

2.5 MODELOS REOLÓGICOS

Según A et al. (2015), los modelos reológicos son ecuaciones matemáticas elaboradas por varios autores para describir el comportamiento reológico de un fluido, este relaciona el esfuerzo cortante que tendría bajo una tasa de corte en específico; además requieren estimar parámetros matemáticos mediante métodos de regresión y/o iterativos con el objetivo de ayudar a acoplar o aproximar la curva o recta que se forma en cada modelo reológico a los datos de esfuerzo cortante que se produce a diferentes tasas de corte, los cuales son obtenidos experimentalmente en laboratorio utilizando equipos como reómetros, viscosímetros rotacionales y entre otros.

Los siguientes autores, (Bali, et al. 2011) mencionan que los crudos pesados presentan un comportamiento no newtoniano; por lo que, se requiere de ecuaciones matemáticas que ayuden a relacionar el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación, y de esta manera ajustar experimentalmente los datos reológicos de los fluidos. De esta manera, se han desarrollado varios modelos matemáticos que son capaces de representar el comportamiento reológico de los fluidos no newtonianos, entre los modelos más destacados se mencionan: modelo plástico de Bingham, modelo de Ley de Potencia de Ostwald-de Waele y, por último; el modelo de Herschel-Bulkley.

En investigaciones relacionadas con el tema de reducción de viscosidad y transporte de crudos, estos modelos son ampliamente utilizados para evaluar el efecto de diluyentes, surfactantes y variaciones de temperaturas sobre las propiedades de flujo de petróleo.

2.5.1 Modelo plástico de Bingham

El modelo de Bingham constituye uno de los modelos más empleados e importantes dentro de la ingeniería petrolera, específicamente en estudios de crudos pesados. El modelo se enfoca en describir fluidos que no comienzan a fluir de manera inmediata cuando se les aplica una fuerza, sino cuando el esfuerzo aplicado supera un valor crítico denominado esfuerzo de cedencia o yield stress.

De acuerdo con (Frigaard, et al, 2017) los autores explican que Bingham observó de manera experimental que no siempre los materiales seguían un comportamiento newtoniano, sino que en ciertos casos los materiales como suspensiones y arcillas no tenían este comportamiento lineal donde el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la tasa de deformación o velocidad de cizallamiento. Dentro de sus experimentos de flujo capilar, detectó que necesitaba superar una tensión mínima antes de comenzar a fluir y de esta manera el flujo seguía una tendencia lineal. Por esta razón, dió origen “fluido de Bingham” considerado el modelo arquetípico de los fluidos con esfuerzo de cedencia.

De manera matemática, la ecuación se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = \tau_y + \mu_p \dot{\gamma} \quad (14)$$

γ = esfuerzo cortante aplicado

τ_y = esfuerzo de cedencia

μ_p = viscosidad plástica

$\dot{\gamma}$ = tasa de corte

El modelo establece que mientras exista una fuerza externa menor que τ_y el material se comportará como un sólido, siempre y cuando dicho umbral es superado. A diferencia de otros modelos, esta característica diferencia al modelo de Bingham de los fluidos newtonianos, señalando que por más pequeño que sea la fuerza aplicada, se tendrá como resultado una deformación continua. Dentro del mismo, los autores manifiestan que actualmente existen modelos matemáticos más complejos como Herschel-Bulkley; sin embargo, el artículo reconoce que muchos fluidos poseen comportamiento no lineal, tixotrópico y viscoelástico; por esta razón, en la actualidad el modelo de Bingham sigue siendo el más utilizado debido a su soluciones analíticas, simplicidad matemática y facilidad operativa.

2.5.2 Modelo de Ley de Potencia de Ostwald-de Waele

Es una ecuación que describe el comportamiento reológico de fluidos no newtoniano, cuya relación es entre el esfuerzo cortante y tasa de corte y que además forma una curva potencial que se ajusta a los pares experimentales mediante parámetros de la ecuación.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (15)$$

Donde los parámetros son K y n , y cada uno expresa matemáticamente una característica del fluido al fluir. El parámetro K se le denomina como índice de consistencia y es asociado a la resistencia que opone el fluido al flujo mientras que el parámetro n es llamado índice de comportamiento de flujo y se clasifica según Rehm et al. (2012) el valor matemático obtenido mediante regresión no lineal o lineal, si $n > 1$ indica que el fluido se comporta como fluido dilatante por corte, si $n = 1$ el fluido tiende a comportarse como un fluido newtoniano; y si $n < 1$ el fluido tiende a tener un comportamiento pseudoplástico o adelgazante por corte.

2.5.3 Modelo de Herschel-Bulkley

El modelo Herschel-Bulkley consiste en una ecuación matemática, el cual tiene 3 parámetros que sirven para describir a más detalle el comportamiento de fluidos no newtonianos con esfuerzo de fluencia y comportamiento no lineal.

$$\tau = \tau_0 + K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (16)$$

Donde los 3 parámetros son τ_0 esfuerzo de fluencia, K índice de consistencia y n que es el índice de comportamiento de flujo. Según Schlumberger (2016) el modelo es una combinación de parámetros de modelos reológicos de Power Law y Bingham, usado específicamente para fluidos que necesitan esfuerzo de fluencia y una relación no lineal de esfuerzo cortante y tasa de corte.

Según la revisión presentada en la Tabla 5 por Livescu (2012), esta tabla demuestra una recopilación de autores que han utilizado los modelos reológicos para el estudio de fluidos no newtoniano como crudos pesados y lodos de perforación.

Tabla 5. Modelos Reológicos empleados en estudios de lodo de perforación y crudos independientes del tiempo.

Autores	Modelo reológico empleado	Fluido estudiado
Vinay et al. (2005)	Modelo Bingham con viscosidad plástica y esfuerzo de fluencia dependientes de la temperatura	WCO
Vinay et al. (2006, 2007)	Modelo Bingham	WCO
Frigaard et al. (2007)	Modelo Bingham	WCO
Reed y Pilehvari (1993)	Modelo Power Law	DM
Hemphill et al. (1993)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Merlo et al. (1995)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Maglione et al. (1996)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Escudier et al. (2002)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Kelessidis et al. (2006)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Ozbayoglu y Omurlu (2007)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Founargiotakis et al. (2008)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Hamed y Belhadri (2009)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Majidi et al. (2008, 2010)	Modelo Herschel-Bulkley	DM
Sorgun y Ozbayoglu (2011)	Modelo Power Law	DM

Fuente. Adaptado de Livescu S. (2012)

Nota. WCO= wax crude oil o crudo parafínico; drilling mud o lodo de perforación.

2.6 MÉTODOS MATEMÁTICOS PARA LA APROXIMACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS

Los parámetros de los modelos reológicos se pueden obtener con diferentes métodos matemáticos, dependiendo si la ecuación forma una línea recta como el modelo de Bingham usando regresión lineal directa o una curva como Power Law y Herschel-Bulkley empleando regresión no lineal, iterativos y entre otros

Para el uso de los modelos reológicos es necesario obtener la aproximación o estimación de los parámetros reológicos de cada ecuación mediante los datos de esfuerzo cortante y tasa de corte obtenidos experimentalmente o su equivalencia que depende del equipo a usar; para el viscosímetro de Fann 35A son la velocidad angular y lectura del dial que mediante fórmulas de conversión del equipo se puede obtener unidades tasa de corte y esfuerzo cortante. La aproximación de estos parámetros se realiza por medio de procedimientos matemáticos como métodos numéricos, y así verificando su exactitud y precisión por medio de minimizar la diferencia de los valores experimentales y los valores calculados por medio de los modelos reológicos. Para determinar la mínima diferencia se usa el criterio de mínimos cuadrados, que tiene la finalidad de minimizar la suma de errores cuadráticos que se producen entre los valores medidos o experimentales y estimados o calculados.

2.6.1 Método de mínimos cuadrados y formulación matricial

El método de mínimo cuadrados consiste en encontrar los valores de los parámetros de cada modelo reológico que minimicen o reduzcan la diferencia entre los valores experimentales y los calculados. La ecuación puede escribir como:

$$S_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (y_i - y_{calc,i})^2 \quad (17)$$

Donde $y_{calc,i}$ corresponde a los valores estimados por el modelo reológicos y y_i los valores experimentales, esta ecuación indica que cuanto menor sea S_r , mayor será el ajuste de la curva calculada a la curva de los valores experimentales.

a) *Mínimos cuadrados lineales*: cuando el modelo se exprese como $y = A\beta + \varepsilon$, la solución se obtiene mediante ecuaciones normales $A^T A\beta = A^T y$, si existe un único parámetro la expresión se reduce $\beta = \frac{\sum_{j=1}^M A_j y_j}{\sum_{j=1}^M A_j^2}$

b) *Mínimos cuadrados no lineales*: cuando los parámetros intervienen de forma no lineal, no es posible obtenerlos mediante ecuaciones normales, por lo tanto se emplea procedimientos interactivos; en cada iteración el modelo se aproxima mediante la matriz jacobiana J, formada por las derivadas parciales respecto de los parámetros. La corrección se alcanza al resolver $(J^T J + \lambda I)\Delta\beta = J^T r$, y los

parámetros se actualizan $\beta_{k+1} = \beta_k + \Delta\beta$, este proceso continúa hasta que la variación de parámetro o función objetivo sea debidamente pequeña.

2.6.2 Métodos matemáticos para la estimación de parámetros del modelo reológico de Bingham y Power Law.

Como se demuestra en la Ecuación (16), ésta formaría una curva potencial, y por lo tanto para transformarla en una línea recta se aplicaría el método de linealización logarítmica.

La siguiente ecuación quedaría de la siguiente manera:

$$\log(\tau) = \log(K) + n \cdot \log(\dot{\gamma}) \quad (18)$$

Donde los parámetros del modelo reológico de Bingham son τ_y y $\dot{\gamma}$, mientras que los parámetros del modelo reológico de Power Law son $K = 10^{\log(K)}$ y n ; y por consiguiente cada una de las ecuaciones de los modelos reológicos presentadas tiene forma de una recta:

$$y = b + mx \quad (19)$$

Por esta razón, para el modelo reológico de Bingham y Power Law, se puede encontrar los parámetros del modelo mediante una regresión lineal.

Donde μ_p y n representan la pendiente:

$$m = \frac{\sum(y \cdot x) - N\bar{x} \cdot \bar{y}}{\sum x^2 - N\bar{x}^2} \quad (20)$$

Además, que τ_y y $\log(K)$ representa el intercepto con el eje de las ordenadas:

$$b = \bar{y} - b \cdot \bar{x} \quad (21)$$

$N = \text{número total de datos experimentales}$

2.6.3 Métodos matemáticos para la estimación de parámetros del modelo reológico de Herschel-Bulkley

En el estudio presentado por Magnon & Cayeux (2021), una de las formas más optimas de encontrar los parámetros requeridos para usar el modelo reológico Herschel-Bulkley es el uso de métodos de regresión no lineal, empleando como inicio los datos experimentales obtenidos en laboratorio que se usan para encontrar parámetros iniciales, y por consiguiente, se ajustaran a la curva experimental mediante los métodos matemático de regresión no lineal.

La ecuación del modelo Reológico de Herschel-Bulkley se puede representar también términos de función de lectura dial y velocidad angular:

$$\theta = \theta_y + Kf^n \quad (22)$$

Donde θ_y es la lectura dial que representa el intercepto con el eje de las ordenadas, K es el ÍNDICE de consistencia en forma de $[grados \text{ de deflexion}][min^n]$ y n es el índice de comportamiento de flujo.

Los métodos de regresión no lineal para el modelo reológico tienen como objetivo minimizar la suma de residuos cuadrados, el cual es representado como:

$$S_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N D_i^2 \quad (23)$$

Donde D_i representa la diferencia entre el valor medido experimentalmente y el valor calculado:

$$D_i = y_i - y_{calc,i} \quad (24)$$

Y $y_{calc,i}$ expresa la ecuación del modelo reológico de Herschel-Bulkley utilizando la letra A con subíndice para diferenciar los parámetros:

$$y_{calc,i} = A_1 + A_2 x^{A_3} \quad (25)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \theta_y ; A_2 = K ; A_3 = n$$

Además, los métodos numéricos de ajuste no lineal, es necesario comprender como es la evolución del modelo cuando se varían sus parámetros, por lo tanto, se forma la matriz de las derivadas parciales también conocida como matriz Jacobiana, la cual es representada con la letra Z cómo:

$$\frac{dy_{calc}}{dA_1} = 1 \quad (26)$$

$$\frac{dy_{calc}}{dA_2} = x^{A_3} \quad (27)$$

$$\frac{dy_{calc}}{dA_3} = A_2 \cdot x^{A_3} \cdot \ln(x) \quad (28)$$

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & x_1^{A_3} & A_2 \cdot x_1^{A_3} \cdot \ln(x_1) \\ 1 & x_2^{A_3} & A_2 \cdot x_2^{A_3} \cdot \ln(x_2) \\ 1 & x_3^{A_3} & A_2 \cdot x_3^{A_3} \cdot \ln(x_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_N^{A_3} & A_2 \cdot x_N^{A_3} \cdot \ln(x_N) \end{bmatrix}$$

a) Método de Levenberg-Marquardt: El método de Levenberg-Marquardt es un procedimiento matemático que tiene como objetivo solucionar problemas de mínimos cuadrados no lineales. Su aplicación resulta en aproximar los parámetros de modelos matemáticos a los datos obtenidos experimentalmente, los cuales no se pueden estimar mediante una regresión lineal. Este método fue propuesto por Levenberg (1944), usado específicamente para problema no lineales de mínimos cuadrados, que posteriormente fue modificado por Marquardt (1963), para la aproximación de parámetros en funciones no lineales. Este método tiene características del método Gauss-Newton y del descenso de gradiente. La ecuación de Levenberg-Marquardt se expresa de la siguiente manera:

$$(\{Z\}^T \{Z\} + \lambda \cdot M) \cdot \{\Delta A\} = \{Z\}^T \cdot \{D\} \quad (29)$$

Donde el factor de amortiguamiento es λ y M es una matriz diagonal expresado de la siguiente manera:

$$M = \text{diag}(\{Z\}^T \{Z\}) \quad (30)$$

Al despejar la corrección de parámetros de la ecuación principal de Levenberg-Marquardt se obtiene:

$$\Delta A = (\{Z\}^T \{Z\} + \lambda \cdot M)^{-1} \cdot \{Z\}^T \cdot \{D\} \quad (31)$$

El cual el parámetro de λ tiene como función controlar el algoritmo. Cuando λ es un valor mínimo, el método estima los parámetros actualizados como de Gauss-Newton, mientras que cuando λ es un valor grande, el método es similar al descenso de gradiente, y, por lo tanto, el método de Levenberg-Marquardt es un método con comportamiento equilibrado.

2.7 VISCOSIDADES DE MEZCLAS DE CRUDOS PESADOS CON DILUYENTES

En el presente estudio (Mohammadi, et al. 2019), mencionan que la elevada viscosidad que presenta el crudo pesado dentro de la industria petrolera es el desafío más grande que se presentan durante procesos de producción, bombeo y transporte. De esta manera, el estudio indica que existen métodos que permiten una considerable reducción de viscosidad, uno de los métodos más comunes es el calentamiento, formación de emulsiones: aceite y agua y, la dilución con solventes. No obstante, como se ha mencionado anteriormente en varios estudios propuestos, la dilución es una de las mejores alternativas prácticas y eficientes para facilitar el transporte de estos fluidos con alta viscosidad, además el uso de diluyentes contribuye a mejorar procesos que se presentarán en el transcurso del tiempo como la deshidratación y desalación del crudo. En este contexto, los autores señalan que el comportamiento viscoso de las mezclas dependerá tanto de la viscosidad de cada componente o volumen empleada durante la mezcla, por esta razón, se han propuesto múltiples modelos matemáticos que permitan estimar la viscosidad resultante de los crudos diluidos.

De la misma manera, (Alade, et al. 2021) el siguiente estudio realiza una revisión integral más profunda acerca de los modelos utilizados para predecir la viscosidad de la mezcla crudo-diluyente, destacando que la viscosidad constituye una de las propiedades termofísicas más importantes durante los procesos que al inicio fueron mencionados. En este estudio, los autores afirman que la elevada viscosidad del crudo limita de manera considerable su movilidad, por lo que los procesos asistidos con los diluyentes representan una alternativa atractiva para optimizar el flujo y aumentar la recuperación del crudo. Finalmente, los autores concluyen que los modelos de viscosidad son fundamentales cuando no se dispone de datos experimentales, de esta manera, el estudio afirma que actualmente aún se puede desarrollar modelos más precisos y generalizados para las mezclas de crudo-diluyentes, especialmente debido al creciente interés en las diversas tecnologías asistidas con diluyentes para la recuperación de crudos pesados.

Los diferentes modelos de viscosidad de mezcla se presentarán a continuación.

2.7.1 Modelo logarítmico de Arrhenius

A diferencia del modelo lineal, este modelo logarítmico de Arrhenius dentro de los sistemas hidrocarburíferos es una de las reglas de mezclas más usadas para calcular la viscosidad de las mezclas, lo que hace de diferente al modelo anteriormente mencionado es que esta ecuación considera que la viscosidad de la mezcla, no necesariamente presentará un comportamiento lineal, al contrario, la distribución de cada componente ocurrirá de forma logarítmica, por lo que, no será un cambio directamente proporcional.

De forma matemática, la ecuación se presentará de la siguiente manera:

$$\ln\mu_m = \varphi_c \ln\mu_c + \varphi_d \ln\mu_d \quad (32)$$

μ_m : viscosidad de la mezcla.

μ_c : viscosidad del crudo pesado

μ_d : viscosidad del diluyente

φ_c : fracción volumétrica del crudo

φ_d : fracción volumétrica del diluyente

El uso del logaritmo natural en el presente modelo matemático es lo que permite representar el comportamiento no lineal característico de las mezclas del crudo pesado y el diluyente. Esto sucede a que se puede generar reducciones significativas de viscosidad sin necesidad de adicionar grandes cantidades de solventes debido a los cambios en las interacciones moleculares y en la estructura interna que presenta cada crudo. En este sentido, los autores manifiestan que este modelo es más apropiado a diferencia de los modelos lineales simples porque proporciona mejores resultados durante su comportamiento experimental.

2.7.2 Modelo de Grunberg-Nissan

El modelo de Grunberg-Nissan es una expresión matemática que se basa en el modelo de Arrhenius añadiendo a la ecuación un parámetro de interacción G ; el cual corrige matemáticamente la desviación de la viscosidad experimental y la calculada mediante el modelo de Arrhenius. Cuando $G=0$, ambos modelos producen el mismo valor. Un valor positivo incrementa la predicción obtenida con el modelo de Arrhenius, mientras que un valor negativo disminuye.

$$\ln(\mu_m) = \phi_c \ln(\mu_c) + \phi_d \ln(\mu_d) + \phi_c \phi_d G \quad (33)$$

μ_m : viscosidad de la mezcla.

μ_c : viscosidad del crudo pesado

μ_d : viscosidad del diluyente

ϕ_c : fracción volumétrica del crudo

ϕ_d : fracción volumétrica del diluyente

G = parámetro efectivo de interacción

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 TIPO Y ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

La investigación del presente estudio se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo, debido a que el estudio tiene como base obtener y analizar datos numéricos que son derivados de las pruebas reológicas que serán realizadas en el laboratorio de petróleos en la Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE). Las medidas que se han realizado han permitido evaluar el comportamiento de cada uno de los crudos pesados antes y después de la adición de varios diluyentes, teniendo en cuenta diversas variables operacionales como temperatura, velocidad de rotación y concentración de la mezcla. El estudio será de tipo experimental, analítico y comparativo, debido a que se estimará el efecto de diversos diluyentes sobre el comportamiento de 2 crudos pesados identificados como: crudo Alfa y Omega. Por esta razón, se implementará la incorporación de los siguientes diluyentes como Diésel-1 y turbosina con el objetivo de establecer la influencia en la reducción de viscosidad y en sus respectivas propiedades de flujos de los sistemas estudiados. Además, los datos que serán medidos en el laboratorio serán procesados y posteriormente ajustados mediante modelos reológicos con el propósito de explicar de manera matemática el comportamiento no newtoniano de los crudos pesados y su adición con diluyentes. Entre estos modelos se mencionan el modelo plástico de Bingham, la Ley de potencia y el modelo de Herschel-Bulkley, facilitando predecir parámetros claves como viscosidad plástica, esfuerzo de fluencia, índice de consistencia y finalmente el índice de comportamiento de flujo.

Al final, el presente estudio también desarrollará un alcance descriptivo y explicativo, por esta razón, también se analizará cómo estas variables influyen en la reducción de la viscosidad y el comportamiento de flujo del crudo pesado en operaciones petrolera

3.2 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población del estudio está conformada por sistemas de crudos pesados y mezclas entre el crudo y el diluyente mediante ensayos de un viscosímetro rotacional Fann 35A, este equipo va a permitir que se establezca lectura dial a diferentes velocidades de operación y temperatura de ensayos en condiciones de laboratorio. Estos sistemas representan fluidos hidrocarburíferos con alta resistencia al flujo, lo que permitirá que la movilidad logre ser alterada mediante la adición de diversos diluyentes con el propósito de mejorar sus propiedades de transporte.

La muestra del estudio está conformada por 2 muestras de crudo pesado que fueron extraídas del Oriente Ecuatoriano con diversos °API, además la selección de los diluyentes considerados en el presente estudio de la investigación corresponde a turbosina y Diésel-1. A partir de estos materiales, se han considerado preparar las mezclas con diferentes concentraciones volumétricas de 5%, 10% y 15%, con el objetivo de evaluar las variaciones de las propiedades reológicas conforme existan diferentes cantidades de diluyentes incorporados. Así mismo, estas concentraciones permitirán establecer el análisis progresivo de la adición de diluyentes sobre el comportamiento reológico de las mezclas evaluadas.

De esta manera, cada prueba experimental será dispuesto bajo diferentes condiciones controladas como la temperatura y homogenización, para posteriormente obtener un sistema de comparación entre el análisis de viscosidad y el comportamiento de flujo.

3.3 TIPO DE MUESTREO

El tipo de muestreo de la investigación se desarrollará mediante un muestreo no probabilístico, debido a que las muestras de crudos empleados y los diluyentes propuestos han sido seleccionados a conveniencia de acuerdo con la facilidad y accesibilidad para la ejecución de los ensayos experimentales. Por esta razón, la selección de las muestras establecerá criterios técnicos, comparativos y operacionales que estén vinculados con los objetivos del presente estudio. Los crudos pesados fueron elegidos en función de su representación y características reológicas dentro de los sistemas de hidrocarburos de elevada viscosidad. Así mismo, los diluyentes fueron escogidos para mejorar la fluidez de la viscosidad durante el ensayo experimental.

Finalmente, este tipo de muestreo garantizará la viabilidad experimental del estudio bajo condiciones y recursos que se encuentren disponibles en el laboratorio. Además, permitirá trabajar de manera específica sistemas experimentales, controlando y facilitando el efecto de las diferentes concentraciones de los diversos diluyentes bajo las mezclas de crudo y diluyente.

3.4 VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables que corresponden al presente estudio fueron propuestas con el objetivo de calcular el impacto que presenta la adición de cada uno de los diluyentes bajo condiciones experimentales sobre el comportamiento reológico de los crudos pesados.

Por esta razón, cada clasificación serán medidas de manera controlada durante su proceso investigativo. Además, los resultados obtenidos permitirán establecer las comparaciones entre los sistemas estudiados y el análisis de cada tratamiento en la reducción de viscosidad y mejora de la movilidad del crudo.

3.5 RECURSOS EXPERIMENTALES

Para el desarrollo del presente estudio fue indispensable organizar equipos y materiales que permitan la preparación de las muestras con datos necesarios para el análisis reológico. A continuación, se presentará la clasificación de los equipos y materiales correspondiente que serán evaluados durante las pruebas de laboratorio.

3.5.1 EQUIPOS

Los equipos empleados durante el estudio de investigación permitirán la preparación de muestras, control de las condiciones experimentales y la determinación de las propiedades reológicas de cada uno de los crudos pesados y mezclas con diluyentes.

- Viscosímetro rotacional de Fann 35A
- Probeta graduada de 100 ml
- Termómetro
- Plato calentador
- Vaso precipitado graduado de 500 ml

- Vaso precipitado del viscosímetro de 350ml

3.5.2 MATERIALES

Los materiales empleados durante el estudio de investigación incluirán las muestras de estudios, tipos de diluyentes y elementos necesarios durante la preparación y ejecución para garantizar los procedimientos experimentales.

- Crudo Alfa
- Crudo Omega
- Turbosina
- Diésel-1
- Materiales de limpieza

3.6 DISEÑO EXPERIMENTAL

Bajo este estudio investigativo el diseño experimental será desarrollado con el objetivo de analizar el comportamiento reológico de los crudos pesados, diluyentes y las mezclas de las incorporaciones al añadir diferentes diluyentes a los crudos pesados con diferentes °API bajo diferentes condiciones de operación. Por esta razón, las medidas reológicas se llevaron a cabo utilizando las velocidades de rotación disponibles mediante un viscosímetro rotacional Fann 35A correspondientes a 3rpm, 6rpm, 100rpm, 200rpm, 300rpm y 600rpm. De esta manera, estas condiciones permitirán la información suficiente para calcular los parámetros reológicos y posteriormente implementar la aplicación de modelos matemáticos que describan el comportamiento del flujo de los sistemas empleados.

Las temperaturas de ensayo que serán establecidas considerando cada característica particular del crudo Alfa y crudo Omega. De este modo, en el crudo Alfa se evaluarán a 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 50 °C y 60 °C y, por otro lado, durante la planificación experimental del crudo Omega este presentaba una viscosidad muy elevada a diferencia del crudo Alfa, por esta razón se incorporó una temperatura y se trabajó con 25 °C, 30 °C, 35 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C y 70 °C debido a la necesidad de alcanzar condiciones que permitan obtener lecturas dentro del rango operativo en todas las velocidades de rotación experimental.

Finalmente, cada crudo será mezclado con cada diluyente en diferentes concentraciones permitiendo evaluar el efecto de la concentración y tipo de diluyente sobre el comportamiento reológico de las mezclas.

A continuación, la siguiente Tabla 6 mostrará el procedimiento de cada sistema.

Tabla 6. Sistemas evaluados a diferentes temperaturas, velocidades angulares y concentraciones de diluyente.

SISTEMAS EVALUADOS	TEMPERATURAS CONSIDERADAS	VELOCIDADES ANGULARES	CONCENTRACIONES
Crudo Alfa	25, 30, 35, 40, 50 y 60.	3-6-100-200-300 y 600.	-
Crudo Omega	25, 30, 35, 40, 50, 60 y 70.	3-6-100-200-300 y 600	-
Diésel-1	25, 30, 35, 40, 50, 60 y 70.	3-6-100-200-300 y 600.	-
Turbosina	25, 30, 35, 40, 50, 60 y 70.	3-6-100-200-300 y 600.	-
Crudo Alfa + Diésel-1	25, 30, 35, 40, 50 y 60.	3-6-100-200-300 y 600.	5%, 10% y 15%.
Crudo Alfa + turbosina	25, 30, 35, 40, 50 y 60.	3-6-100-200-300 y 600.	5%, 10% y 15%.
Crudo Omega + Diésel-1	25, 30, 35, 40, 50, 60 y 70.	3-6-100-200-300 y 600.	5%, 10% y 15%.
Crudo Omega + turbosina	25, 30, 35, 40, 50, 60 y 70.	3-6-100-200-300 y 600.	5%, 10% y 15%.

3.7 PREPARACIÓN VOLUMÉTRICA DE MEZCLAS

Dentro de este estudio se consideró la preparación de cada una de las mezclas y diluyentes teniendo en cuenta que el volumen total del trabajo para cada prueba realizada del trabajo es 350 mL, correspondiente al volumen que se necesita para conseguir el nivel de medición estable en el recipiente del equipo del viscosímetro rotacional Fann 35A. Cada sección de este volumen favorecerá las condiciones de manera uniforme para cada ensayo, permitiendo la correcta inmersión de medición de los equipos utilizados.

Cada una de las concentraciones de los respectivos diluyentes estarán establecidas con 5%, 10% y 15%, con el objetivo de analizar el efecto que cada crudo presenta al incorporar el diluyente sobre las propiedades reológicas de los crudos pesados, esta relación se establecerá mediante:

$$\text{Concentración del diluyente} = \left(\frac{\text{Volumen del diluyente}}{\text{Volumen del crudo}} \right) * 100$$

A partir de esta relación, se determinará los volúmenes requeridos del crudo y diluyente con el fin de certificar la exactitud en la preparación de las formulaciones de cada mezcla, de esta manera se presenta la Tabla 7 donde resume de manera directa las cantidades exactas en cada concentración.

Tabla 7. Concentración volumétrica de crudo y diluyente mediante mezclas experimentales.

CONCENTRACIÓN DEL DILUYENTE (%)	VOLUMEN DEL DILUYENTE (ML)	VOLUMEN DEL CRUDO (ML)
5	17.5	332.5
10	35.0	315.0
15	52.5	297.5

3.8 Método para la obtención de datos experimentales con el viscosímetro de fann35A.

Se evaluará para cada muestra de la siguiente manera:

- Se examinará de manera exhaustiva que el equipo del viscosímetro de Fann35A y sus partes desmontables se encuentren limpios de restos de ensayos pasados.
- Se calculará el volumen requerido de diluyente según la concentración establecida para un cup del viscosímetro de 350 ml, y el restante será llenado por petróleo pesado.
- Se utilizará una probeta graduada de 1 ml hasta 100 ml para depositar el volumen del diluyente, mientras para el crudo pesado se verterá en un vaso precipitado con una escala graduada de 100ml hasta 500 ml
- Se depositará el volumen del diluyente y del petróleo en el cup del turbo mix.
- Se mezclará durante 5 minutos para la homogenizar crudo-diluyente.
- Se introducirá la mezcla homogenizada en el cup del viscosímetro de Fann35A de 350ml.

- Se instalará la combinación de Bob 1- Rotor 1- Resorte 1 en el viscosímetro de Fann35A.
- Se acondicionará la muestra a la temperatura de ensayo mediante el uso de un plato calentador, determinando la temperatura con un termómetro de vidrio con una escala de 1 grado Celsius hasta los 150 grados Celsius.
- Se registrarán las lecturas diales a las diferentes velocidades angulares que dispone el equipo como: 6,3,100,200,300,600 rpm siempre que se encuentre dentro del rango de lectura del equipo.
- Se repetirá el procedimiento para cada temperatura de crudo, diluyente y mezcla crudo- diluyente.
- Se descartarán, las lecturas de dial que estén fuera de la escala o sean inestables.
- Se iniciará la limpieza del sistema de medición antes de evaluar una nueva muestra.

Las mediciones obtenidas se obtendrán manteniendo las condiciones constantes de temperatura y volumen de la muestra. Se incrementará, la temperatura del ensayo de la muestra hasta obtener los registros de lectura dial a todas las velocidades angulares disponibles en el equipo.

3.9 Conversión de unidades de datos obtenidos mediante el equipo de viscosímetro de Fann35A

Las lecturas obtenidas con el viscosímetro serán convertidas en variables reológicas por medio de fórmulas del equipo mencionadas en la Tabla 2 en unidades de campo.

3.10 Manejo de datos experimentales

Los valores del dial convertidos en unidades de campo a esfuerzo cortante y viscosidad aparente para el crudo pesado y sus mezclas con diluyente serán evaluados su efecto de reducción a diferentes condiciones de temperatura, concentración y velocidad angular mediante la siguiente ecuación:

$$\%reducción = \left(1 - \frac{X_{crudo} - X_{mezcla}}{X_{crudo}}\right) \cdot 100 \quad (34)$$

3.11 Ajuste de los modelos reológicos

Los modelos reológicos serán ajustados mediante regresión lineal o no lineal de los parámetros reológico, los cuales considerarán todos los puntos pares evaluados experimentalmente obtenidos del viscosímetro de Fann35A, con el fin de aproximar o estimar matemáticamente el comportamiento de flujo de los crudos pesados, diluyentes y mezclas de crudo-diluyente.

Los modelos seleccionados son Bingham Plastic, Ley de Potencia de Ostwald-de Waele y Herschel-Bulkley

Los parámetros reológicos de Bingham Plastic serán ajustados mediante regresión lineal utilizando todos los puntos pares de esfuerzo cortante y tasa de corte obtenidos experimentalmente, mientras que el modelo reológico de Ley de Potencia se realizará una linealización logarítmica a su fórmula para encontrar los parámetros mediante una regresión lineal.

Los parámetros reológicos del modelo Herschel-Bulkley serán definidos mediante una regresión no lineal, considerando como método primordial el algoritmo de Levenberg-Marquardt, el cual se establecerá valores iniciales de τ_0 , K y n .

Donde τ_0 podrá estimarse mediante extrapolación al eje de las ordenas por la tendencia de lecturas obtenidas a bajas velocidades angulares o mediante las ecuaciones (20) y (21). Mediante el valor obtenido de τ_0 se podrá realizar una linealización logarítmica preliminar y obtener los valores iniciales aproximados para K y n , los cuales serán ajustado mediante el método de Levenberg-Marquardt. El valor del factor de amortiguamiento será de 0.01 y será ajustado durante las iteraciones conforme a la reducción del error.

3.12 Evaluación estadística de los modelos reológicos.

La calidad del ajuste de modelos reológicos será evaluada mediante la suma de mínimos cuadrados, la cual es representada con la Ecuación (17).

3.13 Predicción de la viscosidad del crudo pesado y su mezcla con diluyente

Se selecciono las viscosidades dinámicas aparentes del crudo puro, diluyentes y las mezclas de ambos fueron obtenidas a distintas tasas de corte a una temperatura de 60 °C para el petróleo pesado Alfa y sus mezclas con diluyentes a diferentes concentraciones mientras que para el petróleo pesado Omega y sus mezclas a 70°C.

Las fracciones volumétricas se seleccionadas se basaron para un vaso precipitado del viscosímetro de Fann35A de 350mL a una concentración de diluyente del 5, 10,15 %v/v.

Las predicciones de la viscosidad de las mezclas fueron calculadas mediante los modelos de Arrhenius y Grunberg-Nissan. El parámetro de interacción efectiva G se determinó de las viscosidades experimentales obtenidas mediante el equipo a 5 y 10% v/v con diluyente por lo tanto se resolvió por el método de mínimos cuadrados lineales con algebra matricial, mientras que las mezclas de petróleo pesado con diluyente a la concentración del 15% v/v se reservó para evaluar la capacidad predictiva del modelo Grunberg-Nissan.

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA DE LOS CRUDOS PESADOS Y CON DILUYENTES EVALUADOS

4.1.1 Caracterización reológica del crudo pesado ALFA

Dentro del presente estudio, las siguientes lecturas obtenidas con el equipo del viscosímetro rotacional Fann 35A se logra evidenciar la variación de lecturas diales del crudo Alfa a diferentes temperaturas, aunque el equipo fue diseñado exclusivamente para la caracterización de lodos de perforación, el presente diseño experimental utilizó como una alternativa debido a la ausencia de un equipo que sea específicamente destinado para crudos con alta viscosidad. Por esta razón, se consideró necesario adecuar el procedimiento de medición, que considere sus respectivas limitaciones operativas del equipo y rango de la lectura obtenida. Durante las lecturas diales de cada temperatura, varios valores no fueron registrados debido al exceso de esfuerzo generado por el crudo Alfa que excedió el rango de medición del equipo, produciendo de esta manera una condición de fuera de rango. Por lo tanto, se evaluó hasta una temperatura de 60 °C para la obtención de las lecturas de dial en todas las velocidades angulares de la práctica del crudo pesado Alfa, finalmente de manera experimental se obtuvieron los siguientes resultados en la siguiente Tabla 8.

Tabla 8. Lecturas Dial obtenidas a diferentes temperaturas y velocidades angulares con el viscosímetro de Fann 35A del crudo alfa.

TEMPERATURA °C	3 RPM	6 RPM	100 RPM	200 RPM	300 RPM	600 RPM
25	20.5	40.5	-	-	-	-
30	17.25	34	-	-	-	-
35	16	32	-	-	-	-
40	4.5	8.5	129	258	-	-
50	3	5	75.5	147	216.5	-
60	2	3.5	42	83	122	241

Fuentes. Elaboración propia obtenidos en ensayos de laboratorio mediante el viscosímetro de Fann 35A.

Nota. A partir de diferentes temperaturas y velocidades angulares de 100 RPM no se obtuvieron lecturas diales debido a una deflexión mayor del rango permitido del viscosímetro de Fann

La Figura 2 muestra la relación lineal entre el esfuerzo contante en función de la tasa de corte. Las pendientes más pronunciadas indican las condiciones donde el fluido de alta viscosidad presenta una mayor resistencia al flujo, por esta razón, las pendientes menos pronunciadas, indican una reducción de la viscosidad aparente. De esta manera, las líneas observadas a 40 °C, 50 °C y 60 °C sugieren que, dentro del rango evaluado, el crudo tendrá un comportamiento a un fluido no newtoniano tipo pseudoplástico, donde la viscosidad aparente tiende a disminuir conforme aumenta la tasa de corte aplicada. Al final, estos resultados concuerdan con las investigaciones sobre reología de crudos pesados que manifiestan cómo el aumento de la temperatura modifica la estructura coloidal del petróleo y cómo disminuye la energía necesaria para iniciar el flujo.

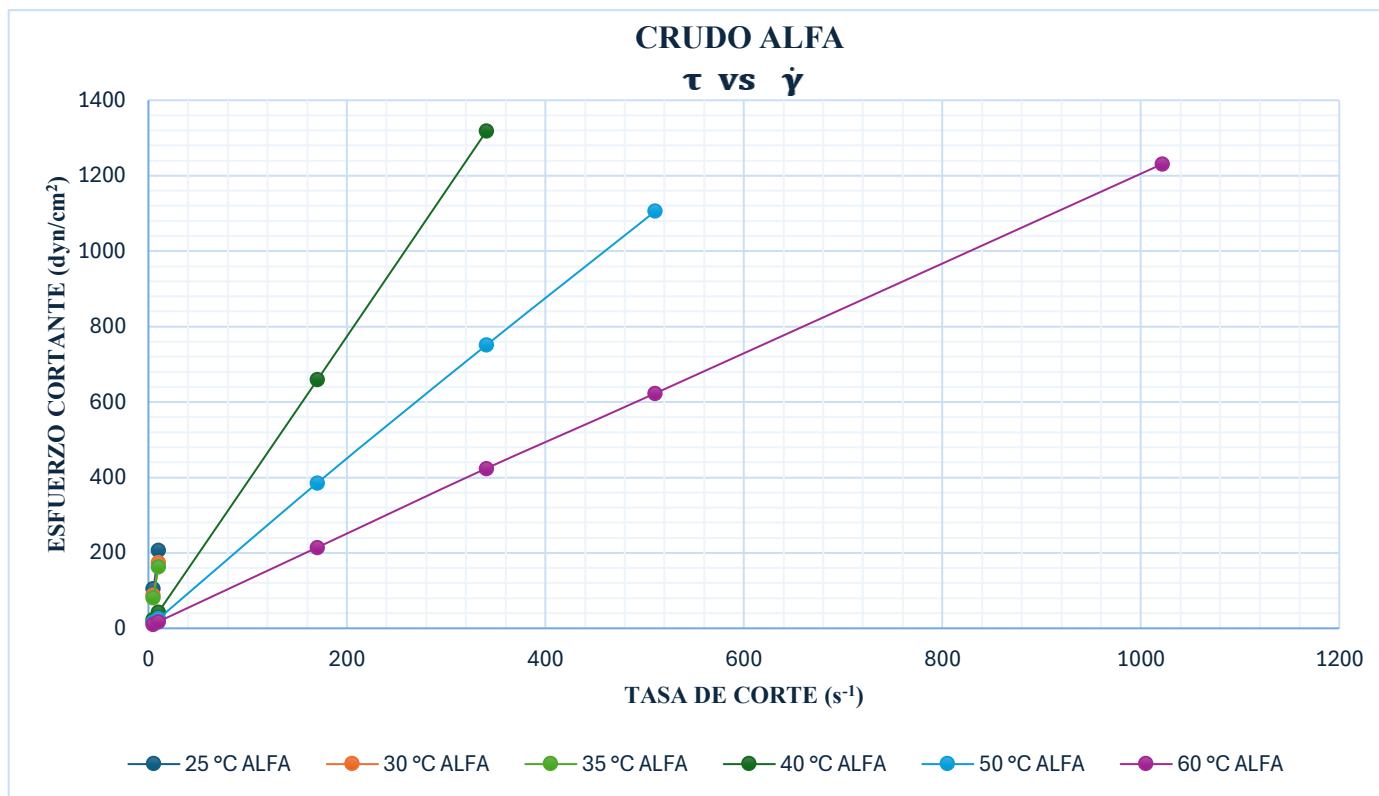


Figura 2. Caracterización reológica del crudo Alfa mediante la relación entre esfuerzo cortante y la tasa de corte a diferentes temperaturas.

La Figura 3 corresponde a presentar la variación de la viscosidad aparente del crudo Alfa en función de la tasa de corte para diversas condiciones de temperaturas mediante el equipo de viscosímetro de Fann 35A. De esta manera, se logra observar que, en las curvas correspondientes a las temperaturas de 25°C, 30°C, 35°C presentan una cantidad mínima de puntos, debido a que, durante el ensayo experimental a superiores velocidades angulares, el equipo de viscosímetro de Fann alcanzó su límite de medición y no se pudo registrar lecturas exitosas. Además, al existir una comparación de cada curva correspondiente a diferentes temperaturas, se logra evidenciar que la viscosidad aparente es menor conforme incrementa la tasa de corte.

Finalmente, la gráfica justifica que la temperatura es una variable de mayor influencia acerca de la reducción de la viscosidad del crudo Alfa, mientras que el aumento de la tasa de corte aporta a disminuir de manera considerable su resistencia al flujo debido a la reorganización del sistema, logrando favorecer su movilidad y, por supuesto, su potencial transporte mediante sistemas de bombeo.

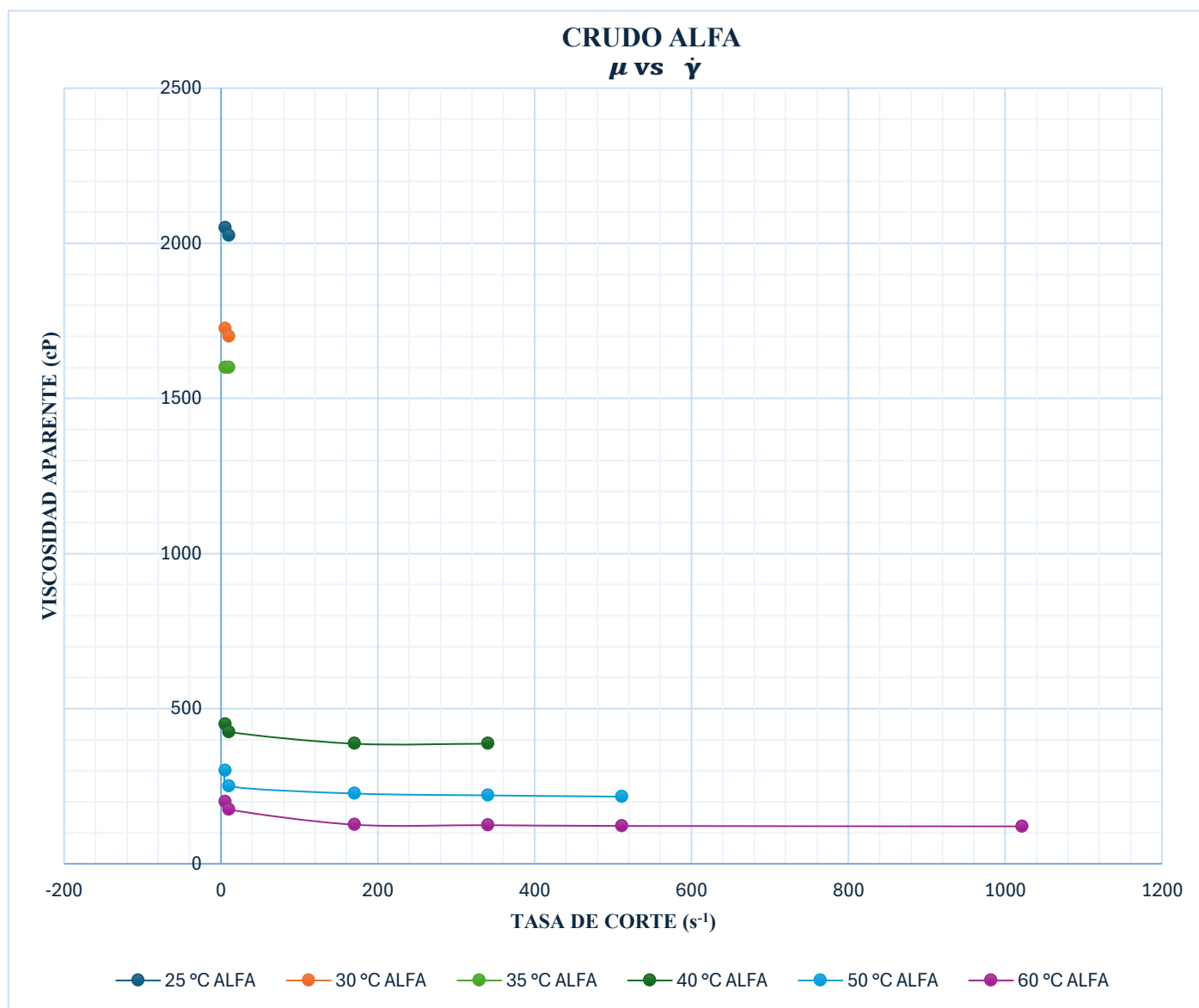


Figura 3. Caracterización reológica del crudo Alfa mediante la relación entre viscosidad aparente y la tasa de corte a diferentes temperaturas.

4.1.2 Caracterización reológica del crudo pesado OMEGA

La siguiente Tabla 9 muestra el comportamiento del crudo Omega, mediante la relación que existe entre el esfuerzo cortante y la tasa de corte. Los resultados que se obtuvieron durante el ensayo experimental evidencian que el crudo Omega necesitó un rango de temperaturas más elevadas para obtener las condiciones de medición parecidos

a las del crudo Alfa. De este modo, durante la planificación experimental del crudo Omega, este presentaba una viscosidad muy elevada a diferencia del crudo Alfa, por esta razón fue necesario incorporar una temperatura extra, quedando de la siguiente manera: 25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 50°C, 60°C y 70°C, la diferencia radica a la necesidad de alcanzar las condiciones que permitan obtener lecturas diales dentro del rango operativo de todas las velocidades de rotación experimental. Los resultados muestran que, a bajas temperaturas fue posible obtener lectura dial únicamente a 3 RPM y 6 RPM, mientras que a temperaturas superiores a 50°C sí. Finalmente, de manera experimental se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 9. Lecturas de Dial obtenidas a diferentes temperaturas y velocidades angulares con el viscosímetro de Fann 35A.

TEMPERATURA °C	3 RPM	6 RPM	100 RPM	200 RPM	300 RPM	600 RPM
25	22	44	-	-	-	-
30	21.5	42	-	-	-	-
35	21	40	-	-	-	-
40	14.5	27	-	-	-	-
50	4.5	7.5	107	210	-	-
60	3	5.5	73	137.5	201	-
70	2.5	3.5	50	93	137.5	260

Fuentes. Elaboración propia obtenidos en ensayos de laboratorio mediante el viscosímetro de Fann 35A.

En la Figura 4 se observa que, para temperaturas como 50°C, 60°C y 70°C, el esfuerzo cortante incrementa de manera cuasi lineal debido al incremento de la tasa de corte. Este resultado indica que el fluido necesita mayores esfuerzos para lograr sostener velocidades de deformación creciente; aun así, sugieren que, dentro del ensayo experimental que ha sido evaluado, el comportamiento reológico es constante. De esta manera, no presenta cambios repentinos durante la resistencia de flujo. Al final, un aspecto que diferencia al crudo Alfa y crudo Omega es que se ha visto en la necesidad de

incorporar una temperatura extra para describir adecuadamente la caracterización reológica debido a la diferencia de viscosidad que ambos fluidos presentan. Al final, este tipo de resultado es peculiar en fluidos que tienen un comportamiento no newtoniano con una relación entre el esfuerzo cortante y tasa de corte aproximadamente cuasilineal. Esta relación comprueba que el aumento de la temperatura no solo disminuye la resistencia de flujo, sino que también amplía el intervalo de las tasas de corte en la cual el fluido puede lograr una mayor confianza en los datos experimentales.

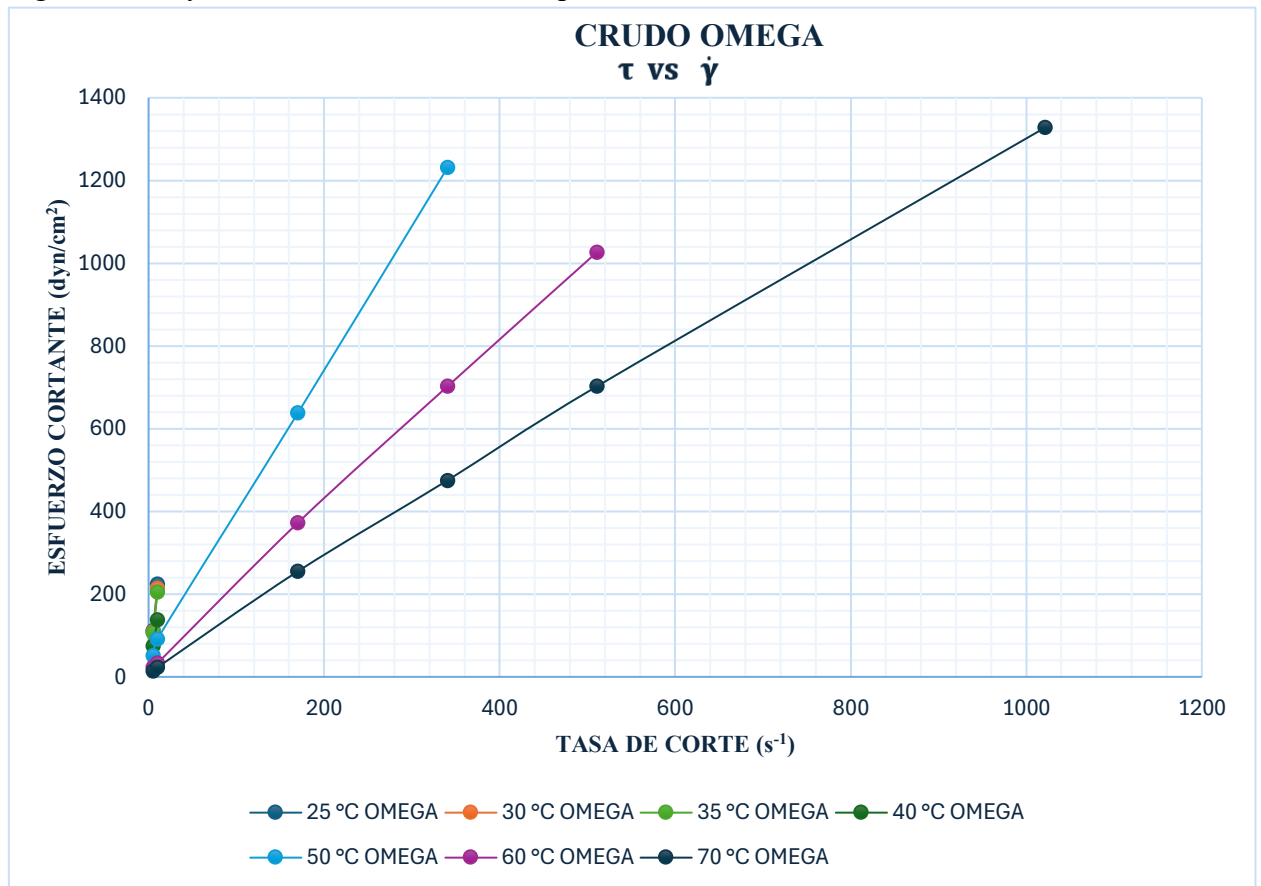
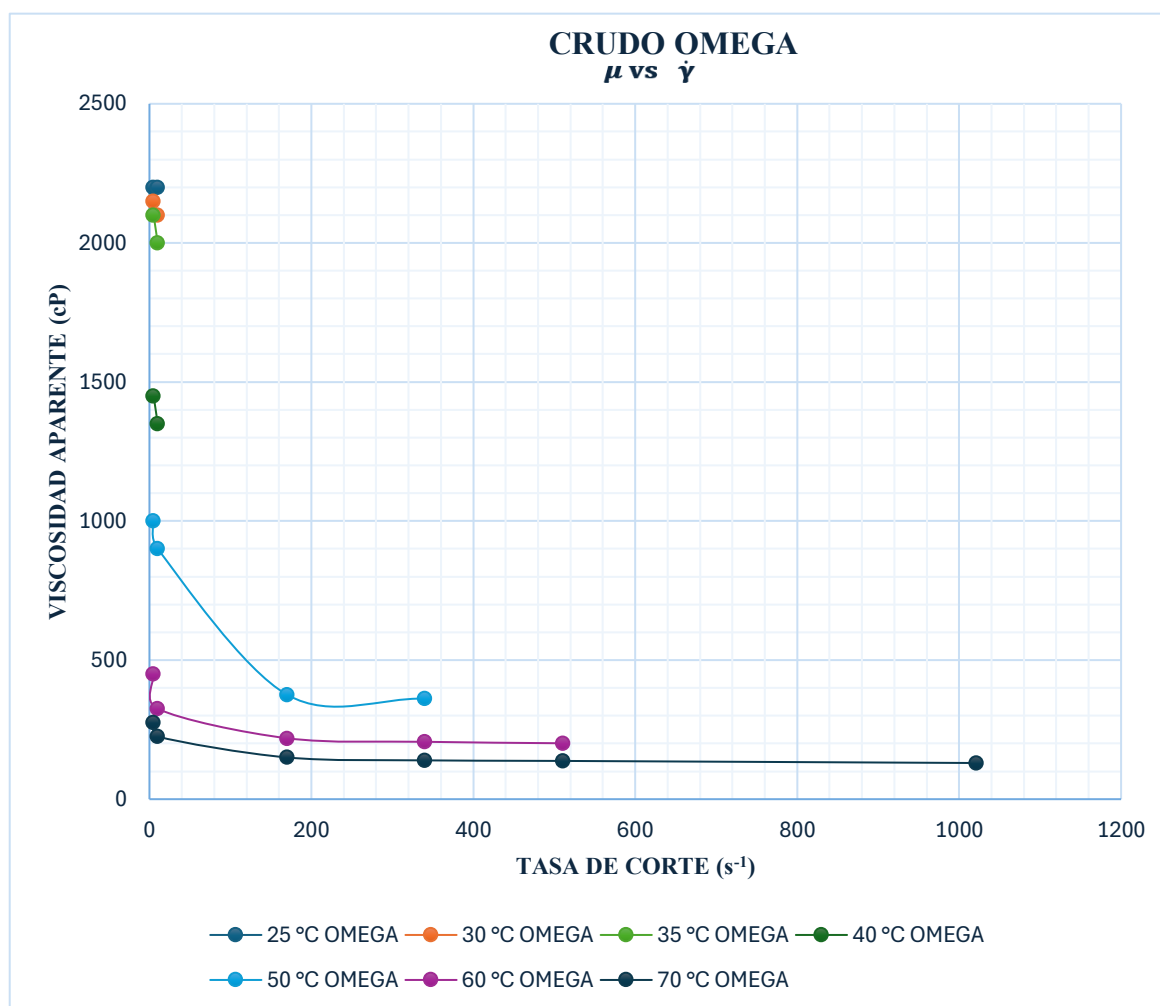


Figura 4. Caracterización reológica del crudo Omega mediante la relación entre esfuerzo cortante y la tasa de corte a diferentes temperaturas.

En la Figura 5 gráfica, se presenta la variación del crudo Omega entre la viscosidad aparente en función con la tasa de corte para diversas temperaturas de ensayo experimental. La viscosidad aparente forma parte de una propiedad importante para lograr definir el comportamiento reológico de los fluidos no newtonianos, ya que define la resistencia que el fluido proporciona al flujo bajo una condición establecida de deformación. Al observar la gráfica se logra contemplar, que para las temperaturas de 50 °C, 60 °C y 70 °C fue factible registrar una mayor cantidad de mediciones con el equipo de viscosímetro de Fann 35A, esta tendencia demuestra que, durante el incremento de velocidad de la tasa de corte, favorece la orientación y reorganización de los agregados

moleculares presente en el crudo. De esta manera, logra disminuir la fricción interna del sistema y, en consecuencia, la viscosidad aparente. En comparación con el crudo Alfa, el crudo Omega logró mostrar valores de viscosidad aparente más altos en las temperaturas iniciales, alcanzando a 25 °C una viscosidad de 2150cP, a diferencia del crudo Alfa que registró valores entre 2025cp y 2050cp a 25 °C, Por esta razón, se comprueba que el crudo Omega dispone una estructura interna más resistente a la formación y, por lo tanto, una mayor dependencia del calentamiento para reducir su alta viscosidad. Al final, estos resultados evidencian para el crudo Omega la viscosidad aparente va a depender al mismo tiempo tanto de la temperatura y tasa de corte.

Figura 5. Caracterización reológica del crudo Omega mediante la relación entre viscosidad aparente y la tasa de corte a diferentes temperaturas.



4.1.3 Caracterización reológica del crudo Alfa con diluyentes seleccionados a diferentes concentraciones %V/V.

a) *Mezcla de crudo Alfa 332.5 ml con Diésel-1 17.5 ml:* en la siguiente Figura 6 se aprecia que a una concentración de 5% v/v de Diésel-1, produjo una mayor reducción de viscosidad y esfuerzo cortante a bajas temperaturas en comparación de la Figura 2 del crudo Alfa que solo influye la temperatura como reductor de las variables reológicas, además se requirió un valor menor de esfuerzo cortante para una misma tasa de corte, lo que evidencia una disminución de la resistencia interna al movimiento.

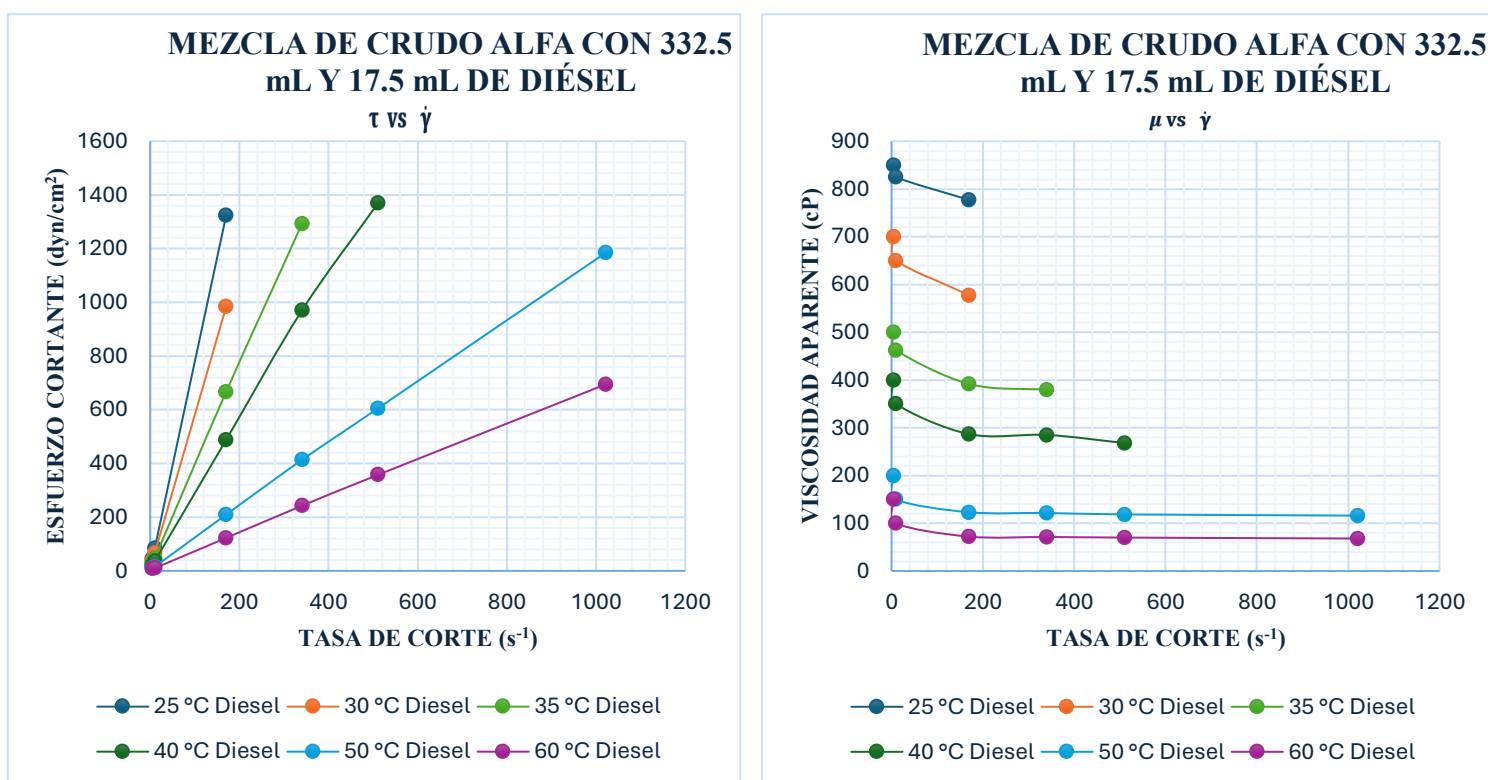


Figura 6. Caracterización reológica del crudo Alfa-Diésel-1 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

b) *Mezcla de crudo Alfa 315 ml con Diésel-1 35 ml:* la Figura 7 demuestra un desplazamiento adicional de la curva hacia menores esfuerzos cortantes, este comportamiento sugiere una mayor desagregación de moléculas de alto peso molecular principalmente en asfaltenos debido a una mayor concentración de diluyente. De esta manera, se destaca que el efecto del diluyente es mucho más evidente, disminuyendo la viscosidad a bajas temperaturas y por consiguiente

permitiendo al equipo medir lecturas diales a velocidades angulares mayores que estaban fuera del rango de medición cuando el crudo Alfa no estaba diluido.

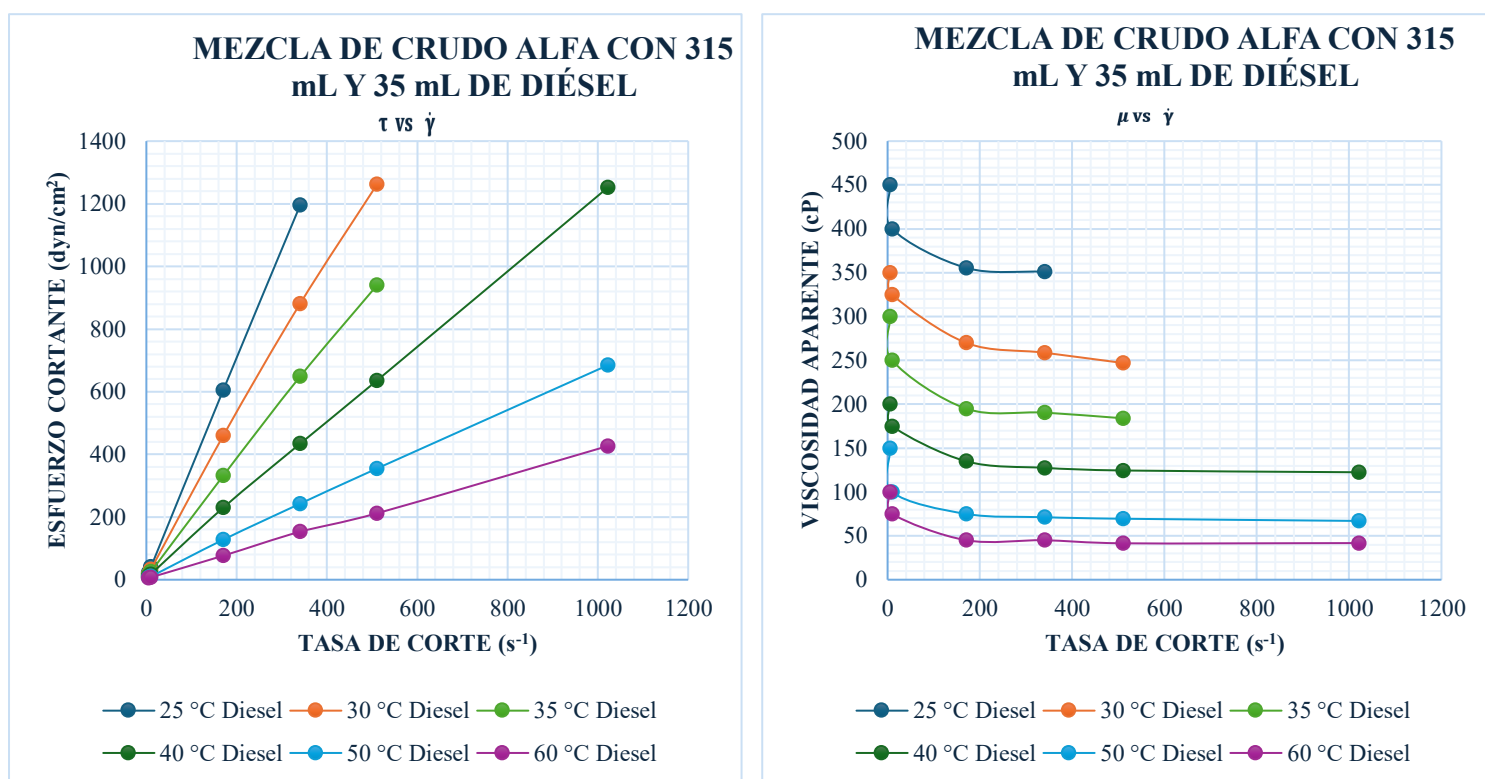


Figura 7. Caracterización reológica del crudo Alfa-Diésel-1 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

c) Mezcla de crudo Alfa 297.5 ml con Diésel-1 52.5 ml: la Figura 8 evidencia que conforme exista un aumento de concentración del diluyente, presentará una reducción de esfuerzo cortante requerido para mantener la misma tasa de corte, obteniendo la mayor reducción de las variables reológicas al aumentar la temperatura a 60 °C, además, la segunda gráfica demuestra que la viscosidad disminuye de manera representativa a bajas tasas de corte mientras que a altas tiende a reducir la viscosidad de manera insignificante en las diferentes temperaturas evaluadas.

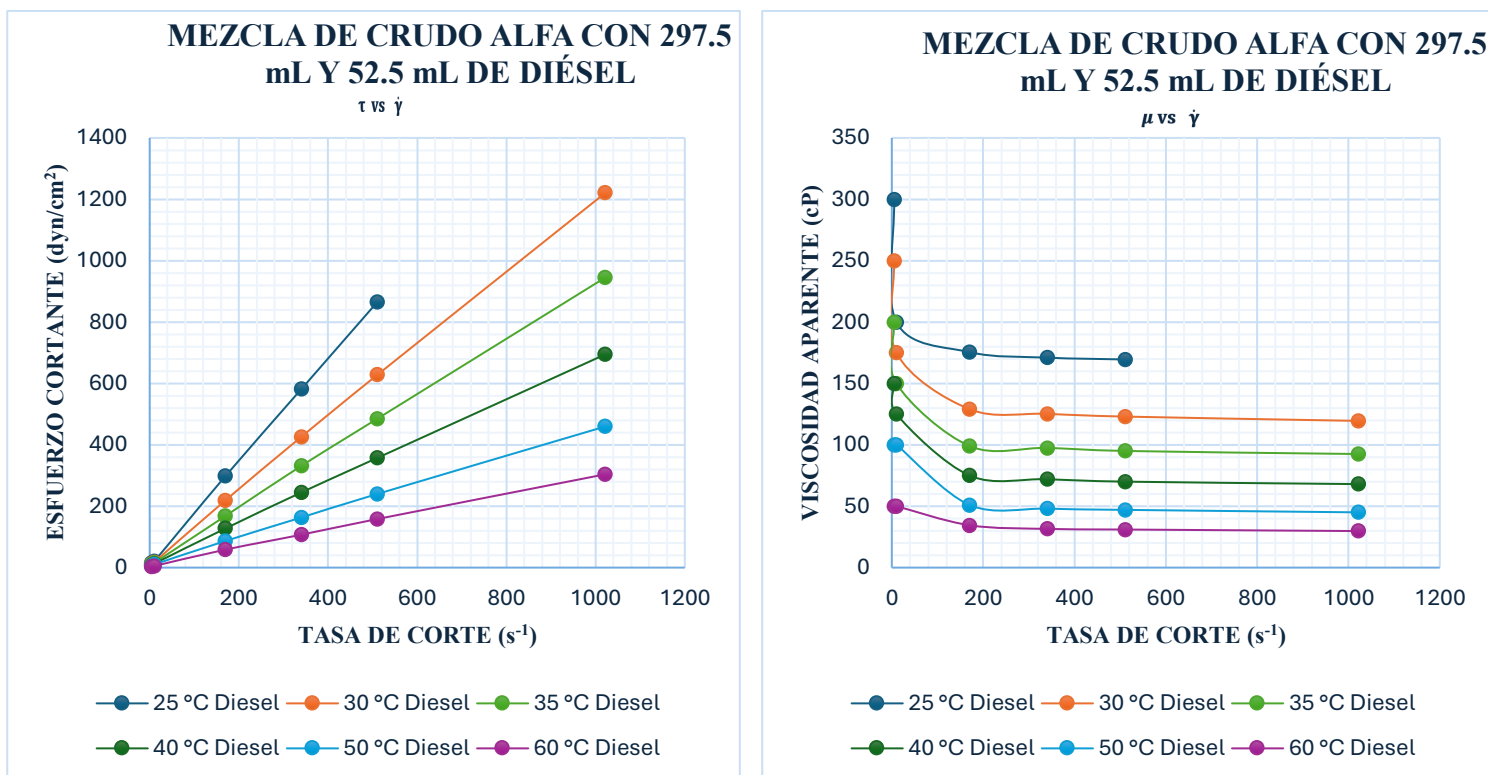


Figura 8. Caracterización reológica del crudo Alfa-Diésel-1 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

d) Mezcla de crudo Alfa 332.5 ml con Turbosina 17.5 ml: la Figura 9 nos demuestra una reducción del esfuerzo cortante y de la viscosidad aparente, no obstante, la dilución con turbosina demostró una menor reducción comparado con la dilución con Diésel-1 a la misma concentración de 5%; las mayores reducciones de las variables reológicas por efecto de dilución se presentaron a 25°C hasta 35°C a bajas velocidades angulares de 3 y 6 rpm mientras que a 40°C se redujo el efecto por dilución pero a 50 °C y 60 °C hubo un ligero incremento, este comportamiento

de reducción por dilución a distintas temperaturas se produjo similarmente cuando se diluyó con Diésel-1 al 5%.

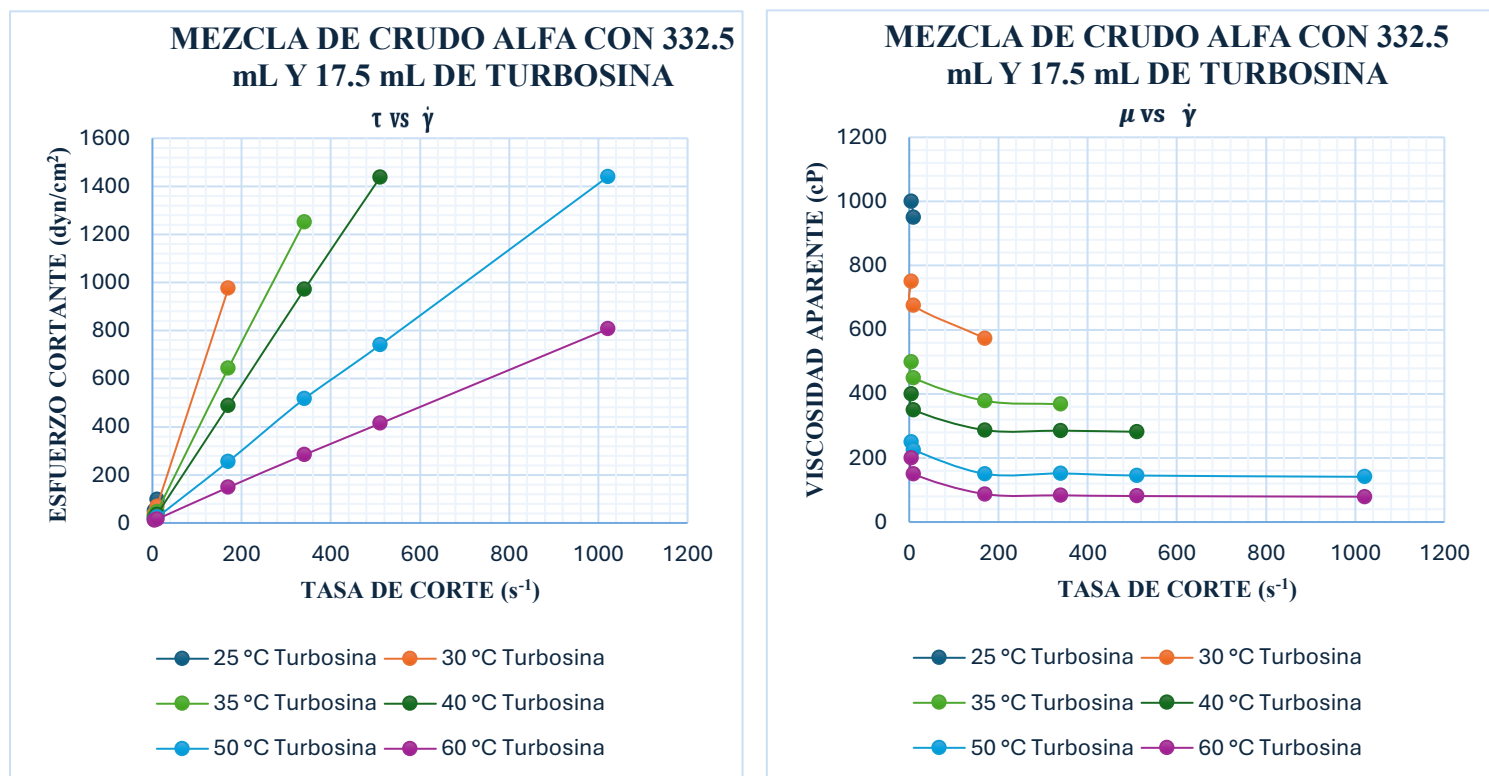


Figura 9. Caracterización reológica del crudo Alfa-turbosina 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

e) *Mezcla de crudo Alfa 315 ml con turbosina 35 ml:* en la Figura 10 se observa que las curvas de esfuerzo cortante y viscosidad aparente con respecto a la tasa de corte son inferiores cuando se aumenta la concentración del diluyente al 10%, y por lo tanto un aumento de la reducción de las variables reológicas a bajas temperaturas y velocidades angulares, sin embargo, esta reducción es menor cuando se compara la dilución del 10% con Diésel-1 pero el comportamiento del efecto de reducción por dilución a diferentes temperaturas es similar al 5% de dilución con turbosina. A partir de velocidades angulares mayores o igual a 100 rpm a distintas temperaturas se puede observar una reducción del esfuerzo cortante y viscosidad aparente no tan significativo, este comportamiento se

presenta en todas las gráficas a diferentes concentraciones y cuando el crudo alfa es puro.

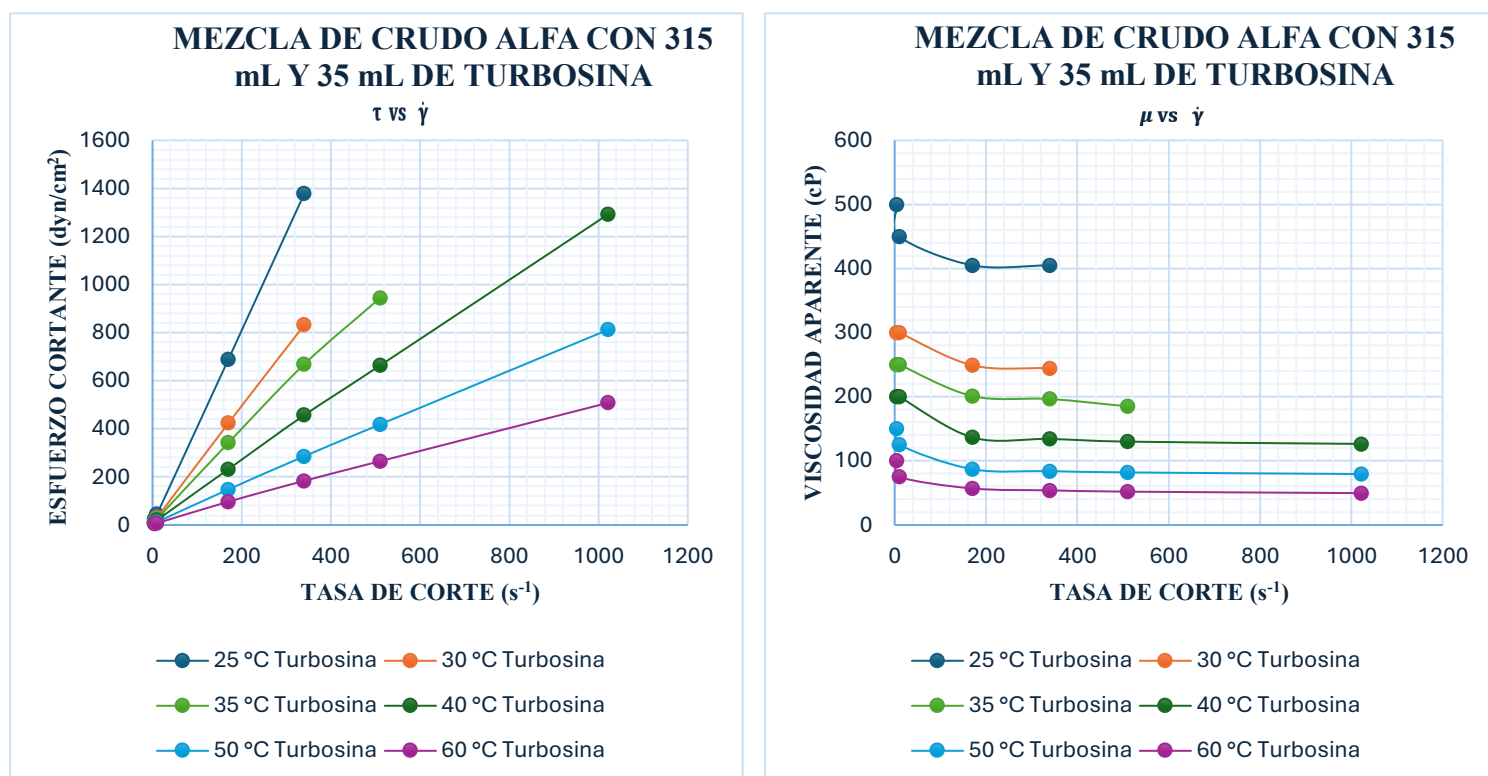


Figura 10. Caracterización reológica del crudo Alfa-turbosina 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

f) Mezcla de crudo Alfa 297.5 ml con turbosina 52.5 ml: al incrementar la concentración del diluyente a 15%v/v, el sistema evaluado durante las temperaturas de 25°C y 35°C logra alcanzar la mayor reducción del esfuerzo cortante durante el intervalo de las concentraciones evaluadas.

A medida que se incrementa la temperatura, las curvas que corresponden al incremento de las tasas de corte indican una mayor concurrencia. Esto se debe a que conforme al efecto combinado entre temperatura y esfuerzo cortante altera un resultado reológico de manera distinta según el régimen de deformación aplicado.

En términos comparativos, estos resultados alcanzaron una máxima reducción con la turbosina y se consolida el comportamiento más favorable del sistema a diferencia del Diésel-1. Sin embargo, ambos diluyentes tienen a seguir una tendencia reológica similar, aunque el Diésel-1 mantenga una ligera ventaja respecto en la reducción del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en la mayoría de los ensayos experimentales. Al final, esta comparación permite inferir que

durante bajo condiciones evaluadas el Diésel-1 presenta una mejor reducción para mejorar las propiedades del flujo del crudo Alfa.

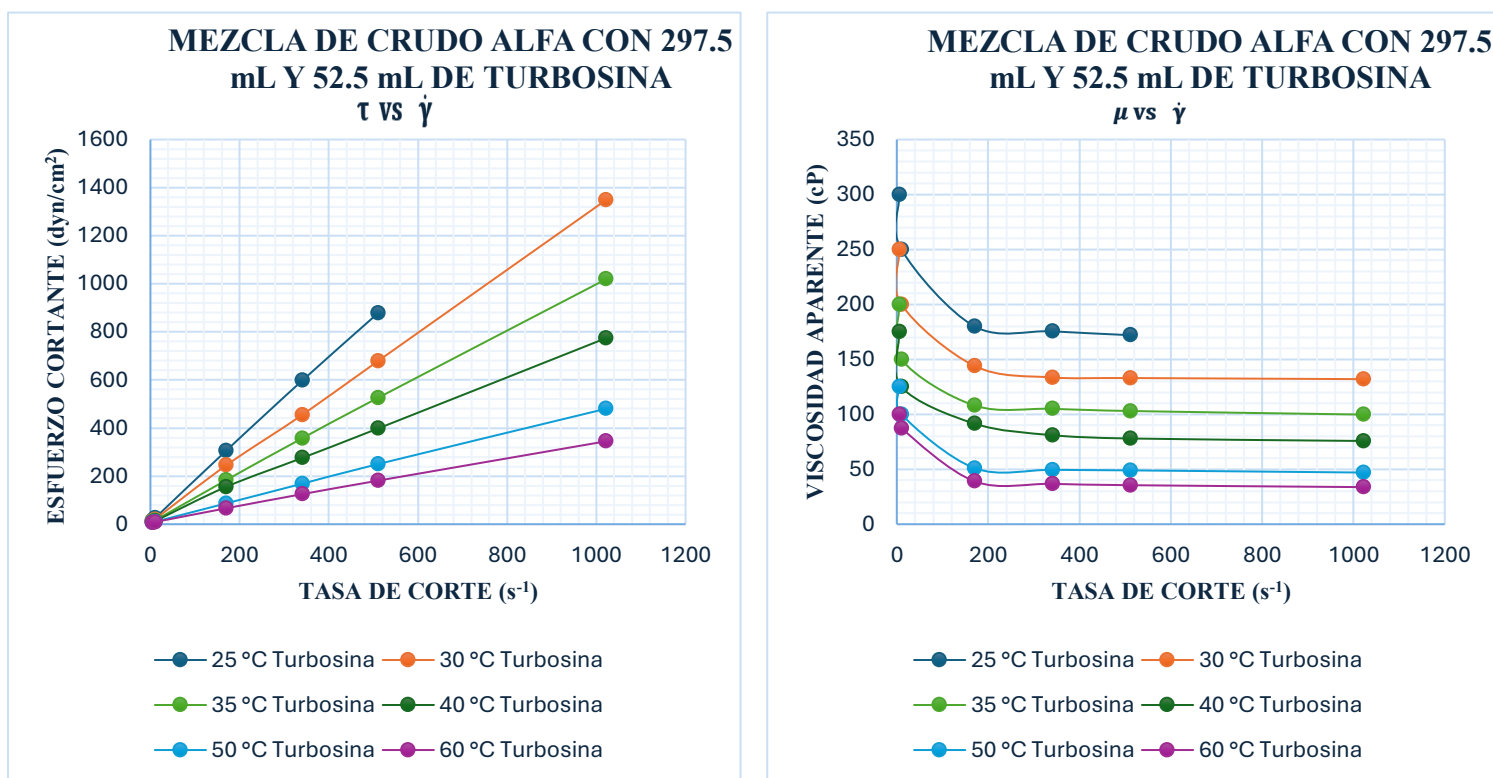


Figura 11. Caracterización reológica del crudo Alfa-turbosina 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

4.1.4 Caracterización reológica del crudo Omega con diluyentes seleccionados a diferentes concentraciones

a) Mezcla de crudo Omega 332.5 ml con Diésel-1 17.5 ml: en la Figura 12 a temperaturas desde 25°C hasta 40°C el elevado nivel de viscosidad limitó la escasa obtención de medir a todas las velocidades angulares y por esta razón se integró ensayos hasta 70°C además mostrando que a esta concentración de 5% v/v de Diésel-1 aún genera una reducción considerable de viscosidad, no obstante, entre 25 y 30 °C la reducción de las variables reológicas dependientes se obtiene en menor parte por efecto de la dilución y en mayor parte por la temperatura y aumento de la tasa de corte aplicada comparadas con el comportamiento reológico del crudo Omega por aumento de temperatura mostradas en la Figura 4 y Figura

5; además que a 35°C se observa la mayor reducción por efecto de dilución. Sin embargo, la reducción por dilución desde 40 hasta 70 grados empieza declinar.

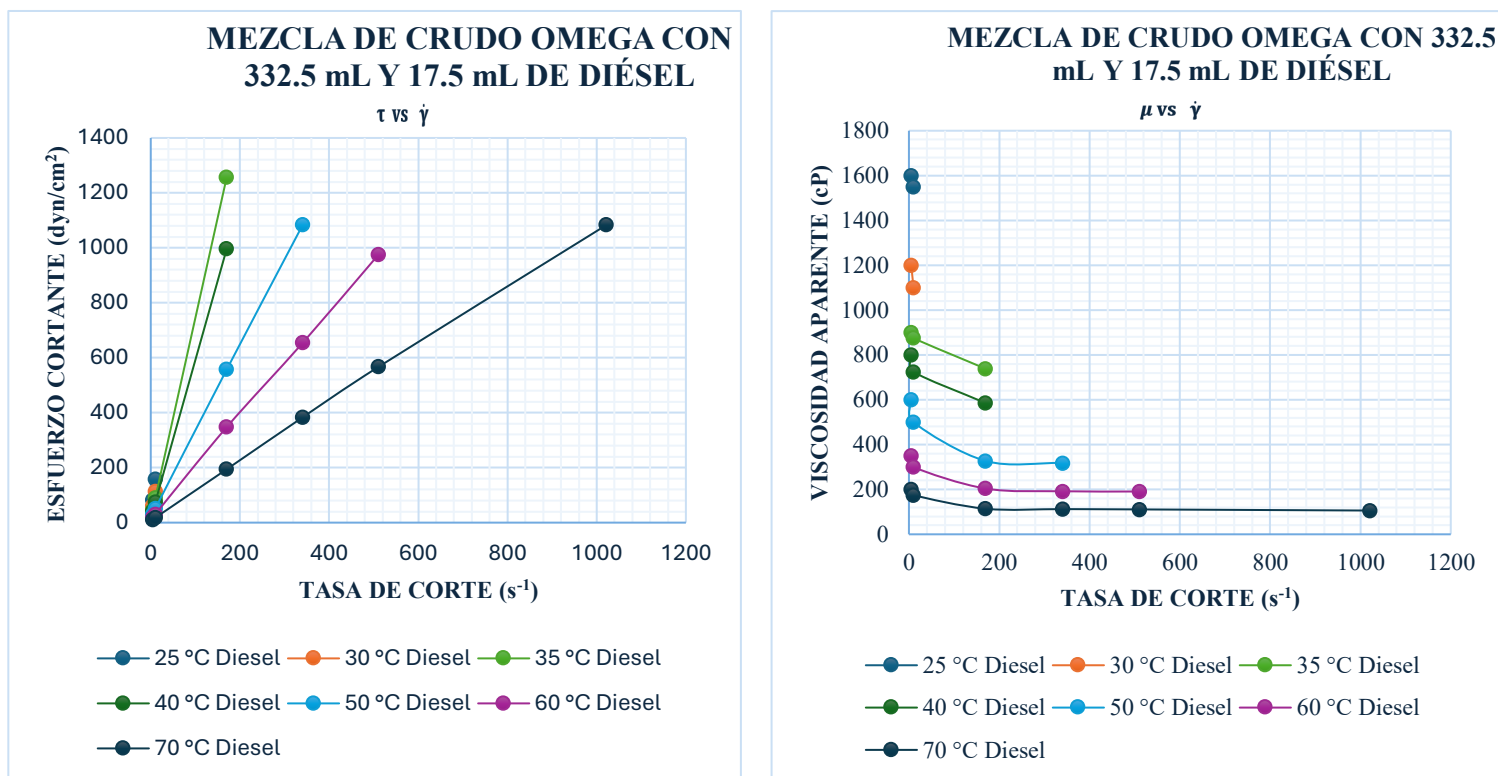


Figura 12. Caracterización reológica del crudo Omega-Diésel-1 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

b) Mezcla de crudo Omega 315 ml con Diésel-1 35 ml: en la Figura 13, podemos observar que al incrementar la concentración de Diésel-1 a 10% v/v, la reducción del esfuerzo cortante aumenta en comparación a la mezcla del 5% v/v favoreciendo y alcanzando su mayor eficacia durante el intervalo de temperatura desde 30°C hasta 40°C, donde el Diésel-1 alcanza una disminución de viscosidad más favorable a la resistencia del flujo. Sin embargo, a partir de 50°C su reducción es menos significativa, esto no implica que el comportamiento reológico tenga una desorientación de la eficacia del diluyente, sino que está asociándose un descenso natural de la viscosidad del crudo que es provocada durante el incremento de la temperatura, por esta razón el aporte del Diésel-1 en la

disminución de la viscosidad se vuelve menos evidente conforme exista un aumento de temperatura.

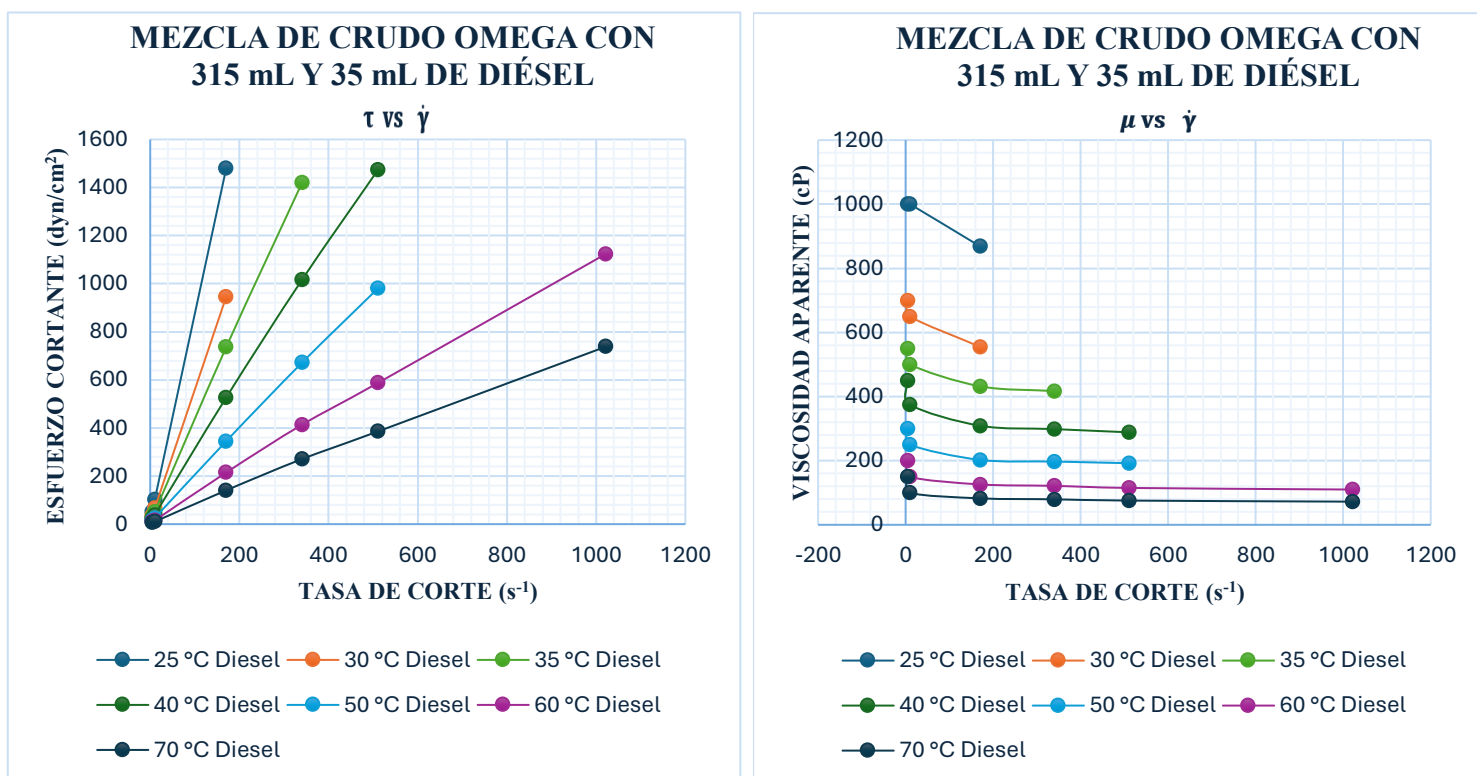


Figura 13. Caracterización reológica del crudo Omega-Diésel-1 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

c) *Mezcla de crudo Omega 297.5 ml con Diésel-1 52.5 ml:* en la Figura 14 se observa el mayor incremento de la reducción de variables reológicas dependientes al diluirlo con 15%v/v con Diésel-1, desde 25°C la reducción aumenta hasta 35°C siendo esta temperatura la de mayor reducción por dilución, a medida que aumenta la temperatura el efecto por dilución disminuye, no obstante, el efecto de reducción se mantiene en mayor parte por dilución y en menor parte por efecto de temperatura y tasa de corte. Además, desde velocidades angulares mayores o iguales a 100 rpm en diferentes temperaturas el efecto de reducción por tasa de corte disminuye considerablemente y por lo tanto la viscosidad varía muy poco predominando en mayor parte su reducción de la viscosidad por la temperatura y

dilución, este efecto de reducción por tasa de corte es similar al comportamiento reológico del petróleo omega a diferentes concentraciones de Diésel-1

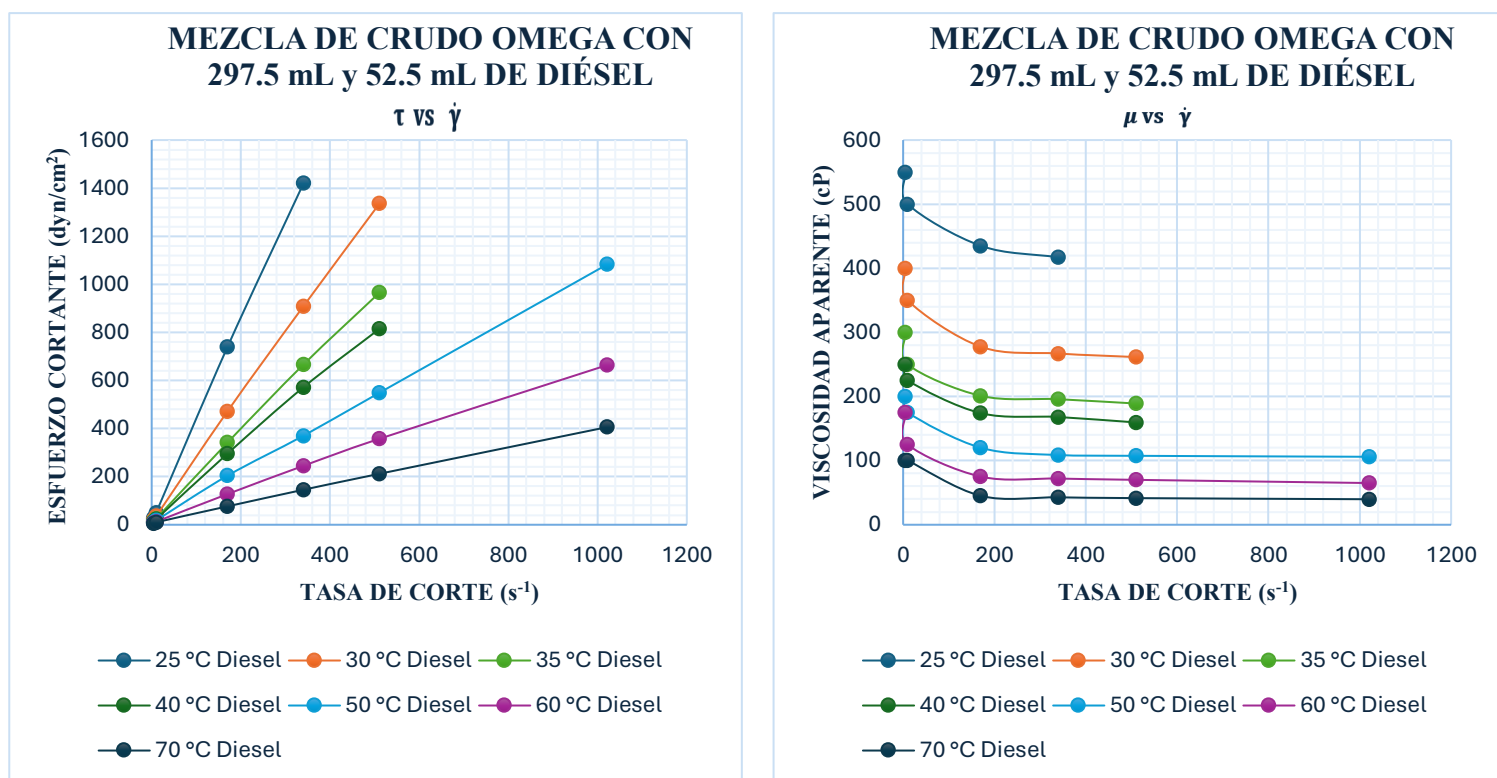


Figura 14. Caracterización reológica del crudo Omega-Diésel-1 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

d) Mezcla de crudo Omega 332.5 ml con Turbosina 17.5 ml: la Figura 15 con una concentración de 5% v/v del diluyente las temperaturas de 25°C hasta 35°C muestran un aumento sucesivo de la reducción del esfuerzo cortante indicando una significativa disminución de la resistencia al flujo. También se puede observar que durante las temperaturas desde 40°C hasta 60°C la reducción de la viscosidad comienza a disminuir de manera considerada. Asimismo, a mayores tasas de corte las curvas tienden a comportarse de manera más homogénea, lo que se manifiesta que el fluido tendrá un comportamiento más reológico conforme incrementa la deformación aplicada. Al final, a 70°C durante 3RPM se evidencia una caída más marcada de la reducción del esfuerzo cortante a diferencia de 60°C, por lo que la incorporación del presente diluyente aporta una reducción adicional menos significativa.

En términos comparativos, a diferencia del 5% v/v del Diésel-1, logramos visualizar que la turbosina alcanza un menor comportamiento del sistema del

esfuerzo cortante y viscosidad aparente en la mayor parte de las condiciones evaluadas.

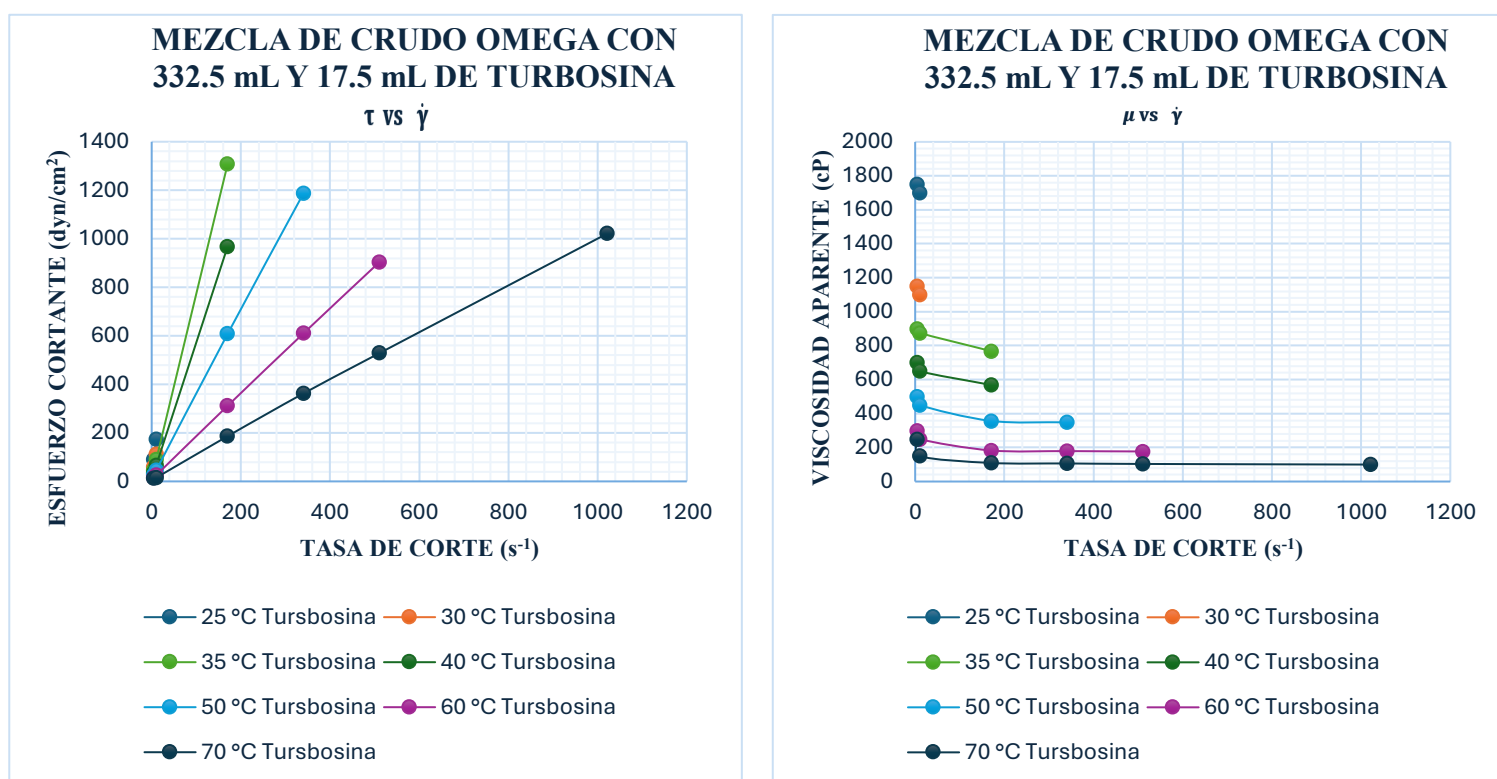


Figura 15. Caracterización reológica del crudo Omega-turbosina 5% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

e) Mezcla de crudo Omega 315 ml con turbosina 35 ml: en la Figura 16 al incrementar una concentración de diluyente a 10% v/v de turbosina, la reducción del esfuerzo aumenta desde 25°C hasta 40°C y luego a 50°C se mantiene prácticamente constante, dando una respuesta mucho más significativa a diferencia del 5% v/v de Diésel-1 que muestra la Figura 12. Sin embargo, a partir de 60°C hasta 70°C durante 3 RPM y 6 RPM se evidencia una caída de reducción a bajas tasas de corte, dando una respuesta reológica menos favorable que en la concentración anterior. En términos comparativos, a diferencia de la concentración de 10% v/v de Diésel-1 la turbosina mantiene un comportamiento

general, no obstante, el Diésel-1 continúa brindando una eficaz disminución de esfuerzo cortante y viscosidad aparente.

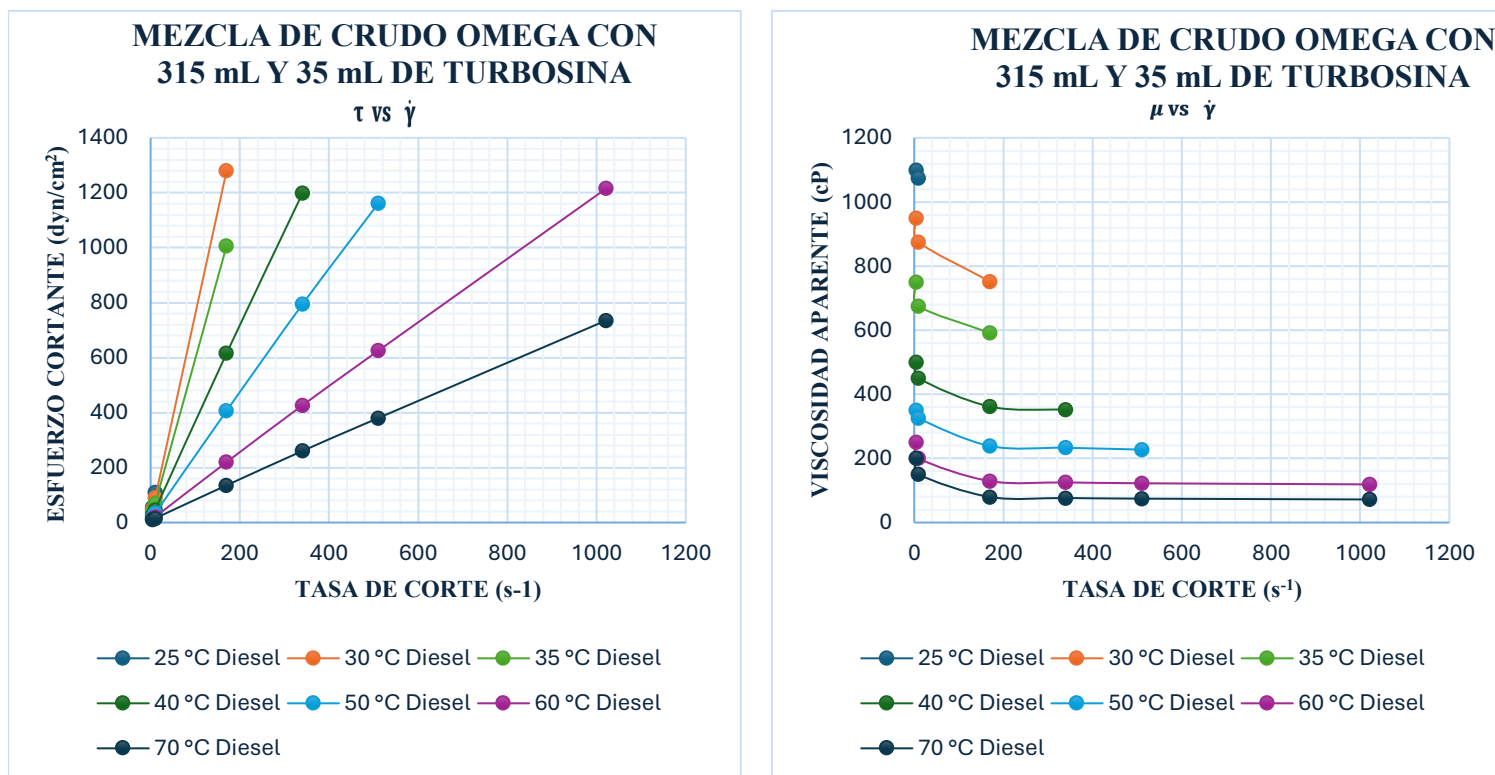


Figura 16. Caracterización reológica del crudo Omega-turbosina 10% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

f) *Mezcla de crudo Omega 297.5 ml con turbosina 52.5 ml:* en la Figura 17 se observa una reducción de esfuerzo de corte y viscosidad aparente al aumentar la concentración con 15% v/v de turbosina alcanza sus niveles desde 25°C hasta 35°C poniendo a prueba que el aumento del diluyente tiene resultados más significativos en relación con la disminución de viscosidad. Se logra observar que a partir de 40°C existe una disminución aceptable la cual continúa hasta 50°C; sin embargo, durante la temperatura de 70°C la reducción baja considerablemente debido a que el calentamiento ya ha modificado considerablemente su estructura interna, aumentando la movilidad de las moléculas, como consecuencia, para que el diluyente produzca una reducción adicional de la resistencia al flujo es menos que a temperaturas más bajas.

Aunque a simple vista el Diésel-1 y la turbosina presenta la misma tendencia del comportamiento reológico, en términos comparativos, el Diésel-1 a una concentración de 15% v/v consigue una mayor disminución en la reducción de

esfuerzo cortante y viscosidad aparente evaluada, lo que demuestra una mejor capacidad para optimizar las propiedades del crudo.

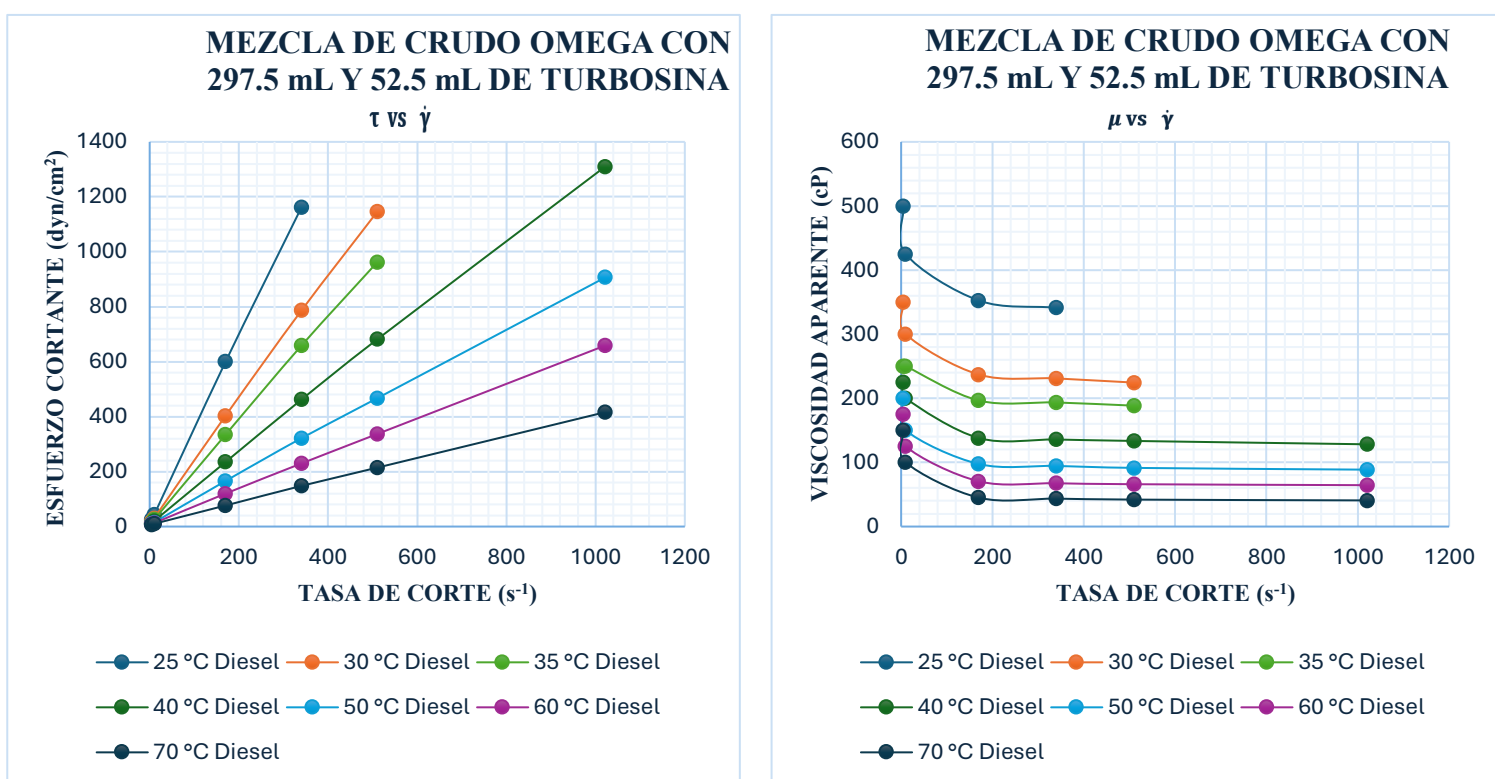


Figura 17. Caracterización reológica del crudo Omega-turbosina 15% mediante la relación del esfuerzo cortante y viscosidad aparente en función de la tasa de corte a diferentes temperaturas.

4.2 Ajuste y comparación de modelos reológicos seleccionados para el crudo Alfa y mezclas con diluyentes

Con el objetivo de explicar de manera matemática el comportamiento reológico del crudo Alfa y sus respectivos diluyentes, se adaptaron los siguientes modelos: Bingham, Power Law y Herschel-Bukley aplicando los ensayos experimentales obtenidos a 60°C.

Los parámetros del modelo de Bingham fueron definidos mediante regresión lineal que se observa en la Ecuación (14) utilizando la totalidad de esfuerzo cortante y tasa de corte obtenidos durante los ensayos experimentales. Después de incorporar Diésel-1 y turbosina en diferentes concentraciones, se muestra en la Tabla 10 que presenta los parámetros reológicos que, durante el caso del modelo de Bingham se concluyó que el crudo alfa sin diluir a una concentración de 15% v/v presentó una viscosidad plástica

aparente de 1.20 cP y un esfuerzo de cedencia de 8,373, mostrando que durante esta concentración de diluyente se presenta una elevada resistencia inicial al flujo. Posteriormente este comportamiento concuerda con los resultados experimentales obtenidos previamente, se había concluido que existe una reducción de esfuerzo cortante y de la viscosidad aparente conforme se incrementa la concentración de los diluyentes. De esta manera, durante la concentración de Diésel-1 del 15% v/v la viscosidad plástica estimada varió entre 0.296 cP y 1.20 cP sin ensayos experimentales, mientras que el esfuerzo de cedencia estimado se encontró entre 4.560. Sin embargo, durante las mezclas con turbosina, el esfuerzo de cedencia no presentó una reducción continua; es decir que a 5% v/v se obtuvo 11.017 cuyo valor superó al diluyente sin ensayos experimentales, posteriormente disminuyó a 8.153 y 7.568 para turbosina bajo la concentración de 15% v/v. Estos valores asignados pertenecen a la pendiente y a la intersección de la recta que mejor se apoderó los puntos experimentales de cada sistema. Al final, el menor valor de este modelo correspondió al crudo Alfa con Diésel-1 al 15% v/v con un valor de $S_r=26.091$ y el mayor valor con turbosina al 10% v/v con $S_r=93.644$.

Para el modelo Power Law, la ecuación (15) potencial fue linealizada mediante una transformación logarítmica mediante la siguiente ecuación:

$$\ln(\tau) = \ln(K) + n \ln(\dot{\gamma}) \quad (35)$$

Acorde a esto, n se logró obtener como la pendiente de la regresión lineal entre $\ln(\dot{\gamma})$ y $\ln(\tau)$, a diferencia de K que se logró determinar a partir del algoritmo de la ordenada al origen. De esta manera, en la Tabla 11 se muestran todos los índices de comportamiento de flujo obtenidos mediante la ley de potencia fueron menores que la unidad, lo que resulta que el crudo alfa sin ensayos experimentales presentó $n=0.902$ y $K=2.245$.

A medida que se empiezan a incorporar los diluyentes conforme incrementa la concentración de Diésel-1 y turbosina el índice de consistencia disminuirá, reflejando una menor viscosidad efectiva del sistema debido a la acción del diluyente incorporado. Sin embargo, aunque este modelo representa de manera correcta la región donde predomina el comportamiento pseudoplástico, las sumas al cuadrado residuales continúan siendo significativamente elevada, principalmente para el crudo sin diluir y para ciertas mezclas con turbosina. De esta manera, los valores que muestran S_r indican que, aunque la linealización posibilitó calcular los parámetros, esta ecuación mostró una diferencia

significativa en relación con los esfuerzos cortantes experimentales cuando fue evaluada con la ecuación original del modelo. Al final, el menor valor de este modelo correspondió al crudo Alfa con Diésel-1 al 15% v/v con un valor de $S_r=51.603$ y el mayor valor con turbosina al 5% v/v con $S_r= 3467.946$

Para el modelo matemático de Herschel-Bulkey los resultados fueron obtenidos mediante la Ecuación (16) y presentados en la Tabla 12. Sin embargo, debido a que es una ecuación no lineal se utilizó el algoritmo de Levenberg-Marquard y se resolvió mediante mínimos cuadrados no lineales para obtener los parámetros en cada iteración, los valores iniciales de los parámetros fueron obtenidos mediante el modelo de Bingham τ_y mientras que K y n de Power Law, lo que favoreció benefició hacia una solución con un margen de error mínimo. La excesiva disminución de la suma de cuadrados residuales a diferencia de los modelos anteriormente mencionados evidencia que Herschel-Bulkley provee la mejor representación matemática del comportamiento reológico del crudo Alfa junto a sus mezclas de Diésel-1 y turbosina. Al final, el menor valor de este modelo correspondió al crudo Alfa con Diésel-1 al 15% v/v con un valor de $S_r=0.808$ y el mayor valor con turbosina al 10% v/v con $S_r= 33.333$.

En términos comparativos, el modelo matemático Herschel-Bulkey presentó menores valores de suma de cuadrados residuales para casi todas las mezclas evaluadas. La incorporación simultánea del esfuerzo de cedencia, el índice de consistencia y el índice de comportamiento de flujo permitieron una respuesta experimental con mayor precisión. La significativa disminución de la suma de cuadrados residuales en comparación con los otros modelos demuestra que este modelo matemático facilita una mejor respuesta del comportamiento del crudo Alfa y de sus mezclas de Diésel-1 y turbosina. Además, los parámetros fueron obtenidos mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt, empleando como condiciones iniciales los valores calculados previamente mediante los modelos de Bingham y Power Law, lo que benefició de manera concurrente hacia una sola respuesta con menor error de ajuste. Por su parte, el modelo de Bingham permitió determinar la disminución de la viscosidad plástica y el esfuerzo de cedencia durante la incorporación de Diésel-1 y turbosina. Por otro lado, el modelo de Power Law identifica el comportamiento pseudoplástico de las formulaciones, al obtener valores de n menores que 1. Finalmente, el modelo de Herschel-Bulkley integró ambos efectos y de esta manera logró presentar la menor diferencia entre los esfuerzos cortantes experimentales y

calculados, por consiguientes, el modelo de Herschel-Buckley se eligió el modelo más conveniente para describir el comportamiento reológico del crudo Alfa y sus mezclas bajo las condiciones de ensayos experimentales evaluados.

Tabla 10. Parámetros reológicos del crudo Alfa y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de Bingham.

SISTEMAS	VISCOSIDAD PLÁSTICA (dyn(s)/cm ²)	ESFUERZO DE CEDENCIA (dyn/cm ²)	SUMA DE RESIDUOS AL CUADRADO (dyn/cm ²) ²
ALFA 60 °C	1.200	8.373	45.864
60 °C ALFA 332.5-17.5DIE	0.677	6.848	42.745
60 °C ALFA 315-35DIE	0.413	5.156	40.873
60 °C ALFA 297.5-52.5DIE	0.296	4.560	26.091
60 °C ALFA 332.5-17.5TURB	0.783	11.017	53.935
60 °C ALFA 315-35TURB	0.495	8.153	93.644
60 °C ALFA 297.5-52.5TURB	0.333	7.568	32.781

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos experimentales obtenidos mediante el viscosímetro Fann 35A y del procesamiento matemático correspondiente al modelo de Bingham.

Tabla 11. Parámetros reológicos del crudo Alfa y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de ley de potencia.

SISTEMAS	ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO ($\text{dyn (s)}^n/\text{cm}^2$)	CONSTANTE K	SUMA DE RESIDUOS AL CUADRADO (dyn/cm^2) ²
ALFA 60 °C	0.902	2.245	2693.870
60 °C ALFA 332.5-17.5DIE	0.866	1.584	1647.400
60 °C ALFA 315-35DIE	0.835	1.180	930.947
60 °C ALFA 297.5-52.5DIE	0.891	0.615	51.603
60 °C ALFA 332.5-17.5TURB	0.824	2.409	3467.946
60 °C ALFA 315-35TURB	0.880	1.098	228.478
60 °C ALFA 297.5-52.5TURB	0.777	1.410	762.904

Tabla 12. Parámetros reológicos del crudo Alfa y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de Herschel-Bulkley.

SISTEMAS	ESFUERZO DE CEDENCIA (dyn/cm^2)	ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO ($\text{dyn (s)}^n/\text{cm}^2$)	CONSTANTE K	SUMA DE RESIDUOS AL CUADRADO (dyn/cm^2) ²
ALFA 60 °C	3.990	0.981	1.366	6.409
60 °C ALFA 332.5-17.5DIE	5.964	0.968	0.981	2.319
60 °C ALFA 315-35DIE	1.267	0.932	0.792	1.217
60 °C ALFA 297.5-52.5DIE	3.541	0.941	0.503	0.808
60 °C ALFA 332.5-17.5TURB	2.487	0.968	0.848	4.004
60 °C ALFA 315-35TURB	3.226	0.976	0.487	33.333
60 °C ALFA 297.5-52.5TURB	1.096	0.943	0.441	2.549

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos experimentales obtenidos mediante el viscosímetro Fann 35A y del procesamiento matemático correspondiente al modelo de la Ley de Potencia.

4.3 Ajuste y comparación de modelos reológicos seleccionados para el crudo Omega y mezclas con diluyentes

Con el objetivo de representar matemáticamente el comportamiento reológico del crudo Omega y de sus mezclas con diluyentes, se ajustaron de la misma manera los modelos reológicos anteriormente mencionados utilizando los datos experimentales obtenidos a 70 °C, temperatura seleccionada debido a que permitió registrar todas las velocidades angulares disponibles en el equipo viscosímetro de Fann 35A. Los valores que presentan las siguientes tablas representan los coeficientes matemáticos que permite reducir los datos experimentales mediante las diferentes ecuaciones.

En el modelo Bingham podemos notar que mediante la expresión de la Ecuación (14) los parámetros tienen forma de una ecuación lineal, donde el esfuerzo de cedencia representa la línea recta que corta el eje de las ordenadas mientras que la pendiente es la viscosidad plástica de la función de la línea recta. El crudo omega sin diluir expone una viscosidad plástica de 1.293 cP junto con un esfuerzo de cedencia 22.744, valores que indican una elevada resistencia al inicio del flujo y a lo largo la deformación del sistema. De esta manera, con la integración de 5% v/v de Diésel-1 logró tener valores en la viscosidad plástica de 1.05 cP para 10% v/v obtuvo 0.719 cP y finalmente 15% v/v 0,393 cP De la misma manera, durante las mezclas con turbosina, la viscosidad plástica a 5% v/v fue de 0.994 cP, a 10% v/v 0.713 cP y, finalmente a 15% v/v 0.402 cP. Estos resultados señalan que tanto el Diésel-1 y turbosina favorecieron la reducción de la resistencia viscosa del crudo Omega, a bajas concentraciones la turbosina logró obtener una reducción ligeramente mayor de la viscosidad plástica, sin embargo, a 15% el Diésel-1 mostró una reducción superior. Por consiguiente, ambos diluyentes mostraron una eficacia comparable para disminuir la resistencia al flujo del crudo Omega bajo los ensayos experimentales. Los parámetros del modelo Bingham se muestran en la Tabla 13 y se puede observar que el valor mínimo dentro del modelo correspondió al crudo Omega con 15% v/v de turbosina dando $Sr=13.103$ y el máximo valor con Crudo Omega sin diluyente $Sr=656.187$.

En el modelo de Power Law, la Ecuación (15) fue utilizada en el presente modelo. Sin embargo, para establecer sus parámetros se utilizó la Ecuación (35)

De esta manera, durante las mezclas de incorporación de cada uno de los diluyentes con diferentes concentraciones de 5% v/v, 10% v/v y 15% v/v, los valores obtenidos en K se muestran en la Tabla 14. La incorporación de Diésel-1 con 5% v/v logró obtener una disminución progresiva del índice de consistencia, cuyos resultados fueron 2.352, 1.548 y 1.438, esta tendencia evidencia una considerable reducción de la consistencia del sistema conforme se aumente la proporción del diluyente. Por su parte, el índice de comportamiento de flujo se redujo al aumentar el porcentaje del diluyente y por consiguiente presenta valores desde 0.877, 0.885 hasta 0.800 respectivamente, cuyos valores permanecen por debajo de la unidad, evidenciando que las mezclas conservaron el comportamiento pseudoplástico. Por otro lado, en las mezclas con turbosina al 5% v/v, 10% v/v y 15% v/v se observó una disminución del índice de consistencia con respecto al crudo Omega sin diluir, obteniendo valores de 2.598, 2.495 y 1.942. De la misma manera, el índice de comportamiento de flujo presentó valores de 0.850, 0.804 y 0.752, mostrando una disminución generalmente gradual conforme se aumentaba la concentración de turbosina. Estos resultados indican que el mínimo valor del índice de consistencia correspondió al crudo Omega con Diésel-1 al 15% v/v con un valor de 1.438. Al final, el menor valor con respecto a la suma de cuadrados residuales fue con Diésel-1 a una concentración de 10% v/v con un valor de $Sr=402.684$ y el mayor valor con turbosina al 5% v/v con $Sr=3766.65$.

En el modelo de Herschel-Bulkley, cabe mencionar que como valores iniciales del algoritmo de Levenberg-Marquard se utilizó el esfuerzo de cedencia calculado mediante el modelo de Bingham y los parámetros de K y n fueron obtenidos por Power Law.

Para el crudo Omega sin diluyente se obtuvo un esfuerzo de cedencia de 4.731, un índice de comportamiento de flujo de 0.932 y un índice de consistencia de 2.070. En las mezclas de Diésel-1 a 5% v/v, 10% v/v y 15% v/v aunque no se evidenció una tendencia de manera continua, los valores dentro de 5% presentó un esfuerzo de cedencia de 4.377, 6.043 y 5.270 como se muestra en la Tabla 15. Por otro lado, el esfuerzo de cedencia de la turbosina para 5% v/v disminuyó considerablemente desde 2.628 hasta 1.174, incrementando posteriormente a una concentración de 15% v/v a 3.732, esta variación indica que el esfuerzo de cedencia no continuó una tendencia uniforme conforme se incrementaba la concentración del diluyente. De esta manera, para el crudo Omega sin diluyente se obtuvo un $Sr=21.684$. Al final, el menor valor de este modelo correspondió

al crudo Omega con Diésel-1 al 10% v/v con un valor de $S_r=0.973$ y el mayor valor con turbosina al 5% v/v con $S_r=28.587$.

En términos generales, los 3 modelos reológicos consiguieron detallar la tendencia de cada uno de los comportamientos observados durante el ensayo experimental; sin embargo, cada modelo mostró diferentes niveles de precisión. En términos comparativos, el modelo matemático de Herschel-Bulkley demostró ser el más adecuado para describir el comportamiento reológico del crudo Omega y de sus respectivas mezclas evaluadas, ya que proporcionó la menor suma de cuadrados residuales y una representación más cercana al comportamiento real del sistema.

Tabla 13. Parámetros reológicos del crudo Omega y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de Bingham.

SISTEMAS	VISCOSIDAD PLÁSTICA (dyn(s)/cm ²)	ESFUERZO DE CEDENCIA (dyn/cm ²)	SUMA DE RESIDUOS AL CUADRADO (dyn/cm ²) ²
OMEGA 70 °C	1.293	22.744	656.187
70 °C OMEGA 332.5-17.5DIE	1.057	13.161	251.534
70 °C OMEGA 315-35DIE	0.719	12.118	244.324
70 °C OMEGA 297.5-52.5DIE	0.393	7.681	32.954
70 °C OMEGA 332.5-17.5TURB	0.994	13.408	170.255
70 °C OMEGA 315-35TURB	0.713	11.523	61.548
70 °C OMEGA 297.5-52.5TURB	0.402	7.666	13.103

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos experimentales obtenidos mediante el viscosímetro Fann 35A y del ajuste matemático correspondiente al modelo de Bingham.

Tabla 14. Parámetros reológicos del crudo Omega y sus mezclas con diluyentes, obtenidos mediante el modelo de ley de potencia.

SISTEMAS	ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO ($\text{dyn (s)}^n/\text{cm}^2$)	CONSTANTE K	SUMA DE RESIDUOS AL CUADRADO (dyn/cm^2) ²
OMEGA 70 °C	0.860	3.254	2671.267
70 °C OMEGA 332.5-17.5DIE	0.877	2.352	2132.525
70 °C OMEGA 315-35DIE	0.885	1.548	402.684
70 °C OMEGA 297.5-52.5DIE	0.800	1.438	871.820
70 °C OMEGA 332.5-17.5TURB	0.850	2.598	3766.665
70 °C OMEGA 315-35TURB	0.804	2.495	3502.997
70 °C OMEGA 297.5-52.5TURB	0.752	1.942	2028.237

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos experimentales obtenidos mediante el viscosímetro Fann 35A y del ajuste matemático correspondiente al modelo de la Ley de Potencia.

Tabla 15. Parámetros reológicos del crudo Omega y sus mezclas con diluyentes, obtenidos por el modelo de Herschel-Bulkley.

SISTEMAS	ESFUERZO DE CEDENCIA (dyn/cm^2)	ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO DE FLUJO ($\text{dyn (s)}^n/\text{cm}^2$)	CONSTANTE K	SUMA DE RESIDUOS AL CUADRADO (dyn/cm^2) ²
OMEGA 70 °C	4.731	0.932	2.070	21.684
70 °C OMEGA 332.5-17.5DIE	4.377	0.955	1.360	6.711
70 °C OMEGA 315-35DIE	6.043	0.962	0.931	0.973
70 °C OMEGA 297.5-52.5DIE	5.270	0.970	0.495	1.422
70 °C OMEGA 332.5-17.5TURB	2.628	0.951	1.489	28.587
70 °C OMEGA 315-35TURB	1.174	0.927	1.199	12.093
70 °C OMEGA 297.5-52.5TURB	3.732	0.950	0.555	1.895

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos experimentales obtenidos mediante el viscosímetro Fann 35A y del ajuste matemático mediante el algoritmo de Levenberg-Marquardt para el modelo de Herschel-Bulkley.

4.4 EVALUACIÓN PREDICTIVA DE LOS MODELOS DE VISCOSIDAD PARA MEZCLAS DE PETRÓLEO-DILUYENTE

Los modelos predictivos de mezclas de Arrhenius y Grunberg-Nissan se aplicaron a las viscosidades dinámicas aparentes obtenidas a diferentes tasas de cortes a una temperatura de 60°C del crudo Alfa y 70°C del crudo Omega. En el modelo de Arrhenius las viscosidades de las mezclas a diferentes concentraciones se calcularon a partir de las viscosidades obtenidas experimentalmente del petróleo y del diluyente sin mezclarlos. En el modelo de Grunberg-Nissan, el parámetro de interacción G fue calculado a diferentes tasas de corte con las concentraciones del 5% y 10% v/v, mientras que el 15% v/v se reservó para medir la capacidad predictiva del modelo.

4.4.1 Modelo de Arrhenius aplicado a la mezcla del petróleo pesado Omega y Alfa con diluyentes

Para la mezcla de Alfa-Diésel-1 se presentó en la Tabla 16, los resultados con el modelo obtuvieron una sobrestimación general al calcular las viscosidades de las mezclas, principalmente en las concentraciones de 10 y 15% v/v además los valores calculados con la tasa de corte de 10.218 presentó la mayor diferencia de suma de residuos al cuadrado de 2268.51, el modelo Arrhenius no estimó adecuadamente la reducción experimental de la viscosidad producida por el diluyente Diésel-1.

En el sistema de Alfa-Turbosina mostrado en la Tabla 17 se obtuvo una gran diferencia con respecto al cálculo de la viscosidad de la mezcla con Alfa-Diésel-1 presentando valores de suma de residuo al cuadrado menores en todas las tasas de corte evaluadas, aunque los valores estimados fueron menores aún presentan sobrestimación de los valores experimentales en mayor medida a concentraciones de 10% y 15% v/v.

En la mezcla de petróleo Omega con diluyente Diésel-1 expuesto en la Tabla 18 la aproximación entre las viscosidades experimentales y calculadas disminuyó considerablemente con respecto con el crudo Alfa. La predicción de viscosidad de mezclas en las tasas de cortes de 340 y 1021.8 s^{-1} presentaron aproximaciones relativamente cercanas a las experimentales. No obstante, el modelo Arrhenius siguió

sobreestimando los valores experimentales principalmente en concentraciones de 10 y 15%v/v, obteniendo mayor suma de residuos al cuadrado a una tasa de corte de 10.218 s^{-1} .

En el sistema de Omega-Turbosina revelado en la Tabla 19 se obtuvieron valores calculados que subestiman a la viscosidad experimental a una tasa de corte de 5.109 s^{-1} mientras que en las demás tasas predominan valores calculados que sobrestiman. No obstante, las viscosidades calculadas fueron menos próximas a los valores experimentales que el modelo Arrhenius aplicado a la mezcla de crudo Omega-Diésel-1 y por lo tanto obteniendo a diferentes tasas de corte una suma de residuos al cuadrado menor.

Tabla 16. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones.

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	200	2.018	150	158.935	100	126.301	50	100.369	1654.293127
10.218	175	2.018	100	140	75	111.999	50	89.599	2268.511523
170.3	126	2.018	72	102.469	45	83.333	34.5	67.77	1752.318769
340.6	124.5	2.018	71.25	101.31	45	82.439	31.5	67.084	1785.737576
510.9	122	2.018	70	99.376	41.5	80.948	31	65.937	1819.837129
1021.8	120.5	2.018	68	98.215	41.75	80.052	29.75	65.247	1820.001927

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 60°C

Tabla 17. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	200	2.22	200	159.697	100	127.515	100	101.819	1192.375046
10.218	175	2.22	150	140.671	75	113.076	87.5	90.894	774.159152
170.3	126	2.22	87	102.96	57	84.133	39	68.749	937.986291
340.6	124.5	2.22	83.25	101.795	54	83.231	36.75	68.053	1089.144872
510.9	122	2.22	81	99.853	52	81.726	35.5	66.89	1112.176612
1021.8	120.5	2.22	79	98.686	49.75	80.821	33.75	66.19	1202.643157

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 60°C

Tabla 18. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	275	2.018	200	215.083	150	168.221	100	131.569	778.07255
10.218	225	2.018	175	177.752	100	140.425	100	110.937	880.703207
170.3	150	2.018	114	120.928	82.5	97.491	45	78.596	700.701598
340.6	139.5	2.018	112.5	112.872	79.5	91.327	42.75	73.894	554.984845
510.9	137.5	2.018	111	111.334	75.5	90.148	41.5	72.993	603.225262
1021.8	130	2.018	106	105.557	72.25	85.71	39.75	69.594	536.023085

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 70°C

Tabla 19. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Arrhenius a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	275	2.22	250	216.114	200	169.838	150	133.471	1165.601644
10.218	225	2.22	150	178.604	150	141.775	100	112.54	521.54794
170.3	150	2.22	109.5	121.508	79.5	98.428	45	79.732	854.365831
340.6	139.5	2.22	106.5	113.413	76.5	92.204	43.5	74.962	642.138838
510.9	137.5	2.22	103.5	111.868	74.5	91.014	42	74.047	684.884987
1021.8	130	2.22	100	106.063	72	86.534	40.75	70.6	569.503025

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 70°C

4.4.2 Modelo de Grunberg-Nissan aplicado a la mezcla del petróleo pesado Omega y Alfa con diluyentes

La implementación del parámetro de interacción G posibilitó corregir parte de las diferencias entre los valores experimentales y calculados con el modelo de Arrhenius, y por aquello G fue calculado individualmente para cada tasa de corte además es considerado un parámetro matemático de interacción que es relacionado a la composición volumétrica de las mezclas y a la condición de tasa de deformación.

En la Tabla 20 se presenta las predicciones de las viscosidades de las mezclas mediante el modelo, el cual tuvo resultados significativos de reducción de suma de residuos al cuadrado. Los valores calculados de viscosidad con 15% de diluyente se obtuvieron con el parámetro calculado mediante las viscosidades experimentales al 5 y 10% v/v, por esta razón, se evaluó su rendimiento de predicción con la mezcla de

diluyente al 15%, obteniendo una suma de residuos al cuadrado menor que utilizando el modelo de Arrhenius, la tasa de corte de 5.109 s^{-1} al 15% tuvo la mayor suma de residuo al cuadrado sobreestimando la viscosidad experimental mientras que en las demás tasas de corte los valores calculados subestimando al valor experimental y obteniendo la menor suma de residuos al cuadrado en la tasa de corte de 10.218 s^{-1} . Además, se obtuvo la menor suma de residuos al cuadrado en diferentes tasas de cortes y concentraciones.

En la Tabla 21 se presentan los valores calculados y experimentales de la mezcla de Alfa-Turbosina, el modelo representó mejor a tasas de corte intermedias y altas, obteniendo sumas de residuos al cuadrado significativamente pequeñas, sin embargo, a tasas de corte bajas el modelo tuvo dificultad al predecir el valor de viscosidad calculado al 15% con diluyente subestimando el valor de viscosidad experimental considerablemente. Además, obteniendo el mayor valor de sumas de residuos al cuadrado a diferentes tasas de corte y concentraciones.

En la siguiente Tabla 22 muestra los valores de viscosidad calculadas y experimentales de la mezcla de Omega-Diésel-1, el modelo redujo notablemente las sumas de residuos al cuadrado con respecto al modelo de Arrhenius, principalmente en concentraciones de 5 y 10% v/v, la cuales fueron utilizadas para calcular el parámetro de interacción. Sin embargo, al evaluar el parámetro con 15% el modelo presentó en la mayoría de las tasas de corte sobreestimación mientras que a una tasa de corte 10.218 s^{-1} subestimo el valor experimental. No obstante, aunque el parámetro G del modelo Grunberg-Nissan predijo mejor las mezclas de viscosidades que el modelo de Arrhenius, presentó un rendimiento menor de predicción a una concentración del 15%v/v con diluyente comparado con el parámetro G obtenido de Alfa-Diésel-1.

En la Tabla 23 se exhibe los valores calculados y experimentales de la mezcla de Omega-Turbosina, los valores calculados a distintas tasas de corte en las concentraciones de 5 y 10 % v/v presentaron correspondencia a los valores experimentales. No obstante, la viscosidad calculada al 15% fue sobreestimada en todas las tasas de corte de los valores experimentales, además la suma de residuos al cuadrado en la mayoría las tasas de cortes y concentraciones presento un valor inferior a Omega-Diésel-1.

Tabla 20. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	G	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	200	2.018	-2.294	150	142.523	100	102.735	50	74.91	341.950
10.218	175	2.018	-5.028	100	110.256	75	71.233	50	47.194	63.6222
170.3	126	2.018	-6.973	72	73.576	45	44.489	34.5	27.855	23.452
340.6	124.5	2.018	-6.875	71.25	73.083	45	44.401	31.5	27.919	8.271
510.9	122	2.018	-7.413	70	69.88	41.5	41.538	31	25.623	14.464
1021.8	120.5	2.018	-7.343	68	69.293	41.75	41.337	29.75	25.582	9.607

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 60°C y el parámetro de interacción se obtuvo con los datos experimentales al 5% y 10% de la mezcla.

Tabla 21. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Alfa-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	G	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	200	2.22	-1.080	200	151.71	100	115.702	100	88.719	1352.889
10.218	175	2.22	-3.273	150	120.413	75	84.221	87.5	59.879	861.660
170.3	126	2.22	-4.156	87	84.515	57	57.879	39	40.47	4.554
340.6	124.5	2.22	-4.682	83.25	81.496	54	54.61	36.75	37.461	1.976
510.9	122	2.22	-4.888	81	79.16	52	52.634	35.5	35.863	1.959
1021.8	120.5	2.22	-5.237	79	76.951	49.75	50.445	33.75	33.946	2.359

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 60°C y el parámetro de interacción se obtuvo con los datos experimentales al 5% y 10% de la mezcla.

Tabla 22. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Diésel-1 obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	G	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	275	2.018	-1.329	200	201.918	150	149.246	100	111.051	63.180
10.218	225	2.018	-3.022	175	153.983	100	106.986	100	75.464	546.257
170.3	150	2.018	-1.721	114	111.433	82.5	83.498	45	63.106	167.713
340.6	139.5	2.018	-1.220	112.5	106.515	79.5	81.827	42.75	63.246	230.664
510.9	137.5	2.018	-1.554	111	103.408	75.5	78.376	41.5	59.867	201.633
1021.8	130	2.018	-1.465	106	98.459	72.25	75.119	39.75	57.734	194.256

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 70°C y el parámetro de interacción se obtuvo con los datos experimentales al 5% y 10% de la mezcla.

Tabla 23. Comparación de viscosidades de la mezcla de Petróleo Omega-Turbosina obtenidas experimentalmente y mediante el modelo de mezclas de Grunberg-Nissan a diferentes concentraciones

TASA DE CORTE	PETRÓLEO	DILUYENTE	G	μ experimental 5%	μ calculada 5%	μ experimental 10%	μ calculada 10%	μ experimental 15%	μ calculada 15%	Sr
5.109	275	2.22	2.088	250	238.655	200	204.963	150	174.198	369.424
10.218	225	2.22	-0.310	150	175.99	150	137.869	100	108.173	444.712
170.3	150	2.22	-2.333	109.5	108.761	79.5	79.785	45	59.215	101.350
340.6	139.5	2.22	-1.911	106.5	103.571	76.5	77.634	43.5	58.751	121.233
510.9	137.5	2.22	-2.096	103.5	101.264	74.5	75.364	42	56.679	110.605
1021.8	130	2.22	-1.867	100	97.058	72	73.144	40.75	55.639	115.818

Fuente: Elaboración propia

Nota: Las viscosidades obtenidas experimentalmente fueron a una temperatura de 70°C y el parámetro de interacción se obtuvo con los datos experimentales al 5% y 10% de la mezcla.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La caracterización reológica del presente estudio permitió determinar que, durante el ensayo experimental conforme se aumentó la concentración del diluyente, existió una reducción progresiva de la resistencia al flujo del crudo. Durante estas concentraciones, con respecto al crudo Alfa, se evidenció que la mezcla con 297,5ml del crudo y una adición de 15% v/v de Diésel-1 presentó un comportamiento más conveniente, registrando los menores valores de lectura dial y una respuesta más uniforme frente al aumento de temperatura, lo que indica una mayor disminución de viscosidad aparente del sistema. Entre las diferentes concentraciones evaluadas la mezcla con 297,5ml del crudo Omega y una adición de 15% v/v de Diésel-1 volvió a presentar una respuesta más conveniente frente al aumento de la temperatura y tasa de corte.

Al final, este comportamiento concuerda con la literatura que aporta la dilución de crudos pesados, donde el aumento de la fracción de un diluyente reduce las interacciones entre las moléculas de alto peso molecular, especialmente entre resinas y asfaltenos, favoreciendo de esta manera a tener menor viscosidad del crudo y a su vez permitiendo la movilidad de este.

En términos comparativos, se concluyó que bajo las condiciones experimentales del presente estudio la incorporación del 15% del Diésel-1 proporcionando la alternativa más efectiva de los crudos pesados evaluados, siendo especialmente efectiva en el crudo Alfa para la reducción del esfuerzo cortante y viscosidad aparente, permitiendo mejorar su comportamiento reológico, mientras que el crudo Omega por su mayor viscosidad, requirió temperaturas más elevadas para conseguir un comportamiento reológico comparable.

El modelo Bingham proporcionó una representación intermedia debido a que el valor de la suma de residuos al cuadrado fue superior al obtenido con el modelo reológico de Herschel-Bulkley, lo que indica que la ecuación lineal no reprodujo completamente un ajuste a los puntos pares obtenidos experimentalmente mientras que el modelo de Power Law fue el modelo que menor capacidad de ajuste obtuvo a los valores experimentales debido a que no incorpora esfuerzo de cedencia como parámetro necesario para representar a los sistemas analizados.

El modelo reológico de Herschel-Bulkley demostró la mejor representación matemática del comportamiento reológico para los petróleos pesados Alfa y Omega y sus mezclas con diluyente, debido a que lograron los menores valores de suma de residuos al cuadrado en todos los sistemas estudiados. Esto demuestra que la combinación de parámetros y del comportamiento no lineal describe mejor los puntos pares experimentales reológicos. Los valores obtenidos del índice de comportamiento de flujo indicaron que los sistemas presentaron un comportamiento pseudopolítico, caracterizado por la disminución de la viscosidad al aumentar la tasa de corte mientras los valores positivos de índice de consistencia disminuyeron al aumentar la concentración del diluyente, no obstante, la proporción de reducción de K dependió del crudo-diluyente empleado y de los demás parámetros, los cuales deben interpretarse como resultados de ajuste matemático de los datos experimentales y no como valores independientes de la temperatura, composición o tasa de corte.

Los resultados demostraron que el modelo de Grunberg-Nissa represento una mejor capacidad para predecir las viscosidades dinámicas aparentes de las mezclas petróleo-diluyente que el modelo de Arrhenius en los cuatro sistemas evaluados; obteniendo valores menores de suma de residuos al cuadrado. El modelo de Arrhenius tendió a sobreestimar la viscosidad aparente de los sistemas, principalmente en las concentraciones de diluyente de 10 y 15% v/v mientras que el modelo de Grunberg-Nissa, calibrado el parámetro de interacción G con las mezclas de 5 y 10 % v/v, alcanzó con mayor aproximación a los valores experimentales con la concentración de 15% en los sistemas de crudo Alfa, significativamente con turbosina a tasas de cortes intermedias y altas, sin embargo, para el petróleo Omega aunque redujo los residuos al cuadrado, la predicción de la mezcla al 15% obtuvieron valores no tan aproximados a los

experimentales en comparación a los valores calculados para el petróleo Alfa. En consecuencia, Grunberg-Nissan fue el modelo más apropiado para la predicción, aunque el modelo dependió tanto del crudo-diluyente y de la tasa de corte aplicada.

5.2 RECOMENDACIONES

Durante el estudio experimental, se recomienda que para próximas investigaciones empleen un equipo diseñado específicamente para fluidos con alta viscosidad para evitar la pérdida de información durante el ensayo ocasionada por lecturas fuera de escala en determinadas velocidades angulares y temperaturas, ya que el equipo utilizado en la presente investigación como es el viscosímetro de Fann 35A fue desarrollado para evaluar lodos de perforación y no fluidos altamente viscosos. Sin embargo, el equipo permitió adquirir resultados coherentes y se lo consideró su adaptación dentro del presente estudio.

Además, se recomienda analizar el comportamiento reológico de los crudos utilizando otros diluyentes como condensados, nafta o mezclas de otros hidrocarburos ligeros para relacionar su desempeño con el Diésel-1 y la turbosina determinando opciones que propongan una mayor eficiencia técnica y económica.

Finalmente, se recomienda que cada equipo se encuentre limpio y los viscosímetros previamente calibrados antes de ser usados para mejorar la cobertura del equipo y a su vez garantizar la obtención de mediciones durante el ensayo experimental

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Benavides, A., Benjumea, P., Cortés , F. B., & Ruiz, M. A. (22 de Mayo de 2021). Chemical Composition and Low-Temperature Fluidity Properties of Jet Fuels. *Processes*, 7(1184). doi:10.3390/pr9071184
- Ghannam, M. T., Hasan , S. W., Abu-Jdayil, B., & Esmail, N. (4 de Enero de 2012). heological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 122-128.
- A. A., A. M., Abdullah, S, A. M., & R, U. M. (2015). CHARACTERIZATION AND RHEOLOGICAL BEHAVIOR OF VARIOUS.
- A., S., I. , H., & J. F., A. (2006). Pipeline Transportation of Heavy Oils, a Strategic, Economic and Technological Challenge.
- Abarca, A., Guzman-Beckmann, L., & Castillo, J. (2020). Estudio del Efecto de Reductores de Viscosidad en Crudo Pesado. *Revista Tecnológica ESPOL*.
- Abarca, A., Guzmán-Beckmann, L., & Castillo, J. (2020). Estudio del Efecto de Reductores de Viscosidad en Crudo Pesado.
- Academia del Transportista. (s.f.).
- Alade, O. S., Al Shehri, D. A., Mahmoud, M., Olusegun, S., Shahzad Kamal, L. M., & Al-Nakhli, A.-N. (22 de Febrero de 2021). Viscosity models for bitumen–solvent mixtures. *Journal of Petroleum Exploration and Production*, 1505-1520. doi:10.1007/s13202-021-01101-9
- Alade, O. S., Al Shehri, D. A., Mahmoud, M., Olusegun4, S., Lawal, L. O., Kamal, M. S., & Al-Nakhli, A. (2021). Viscosity models for bitumen–solvent mixtures. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*.
- Alcántara, A. (5 de Diciembre de 2023). *Composición y reología de crudos pesados*. Obtenido de LinkedIn: <https://es.linkedin.com/>
- Alomair, O., Jumaa, M., Alkorie, A., & Hamed, M. (2016). Heavy oil viscosity and density prediction at normal and elevated. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*.
- Anton Paar México, S.A. de C.V. (2020). *Asfaltenos: Tamaño de partícula, evaluación de la eficiencia de inhibidores de crecimiento en petróleo crudo*. Obtenido de

- Petroquimex: <https://petroquimex.com/PDF/MarAbr20/Asfaltenos-AntonPaar.pdf>
- Arinina, M., Zuev, K., Kulichikhin, V., & Malkin, A. (2019). Superposition of temperature and diluent concentration for the viscosity reduction of heavy oil.
- Aulton, M. (2004). *Pharmaceutics: The Science of Dosage Form Design*. Churchill Livingstone.
- Badalan, M., León Aboytes, E., Di G. Sigalotti, L., & Guzmán, E. (2026). Rheological Characterization and Viscosity Correlation for a 9.5 °API Extra-Heavy Crude Oil of the Southern Gulf of Mexico.
- Bali, A., Oyeneyin, B. M., & Adom, E. (2011). Rheological Characterisation of Heavy Oil and Impact on its Production Enhancement. En T. T. Ltd. (Ed.), *Advanced Materials Research*. 367, págs. 393-401. Bäch, Switzerland: Trans Tech Publications. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.367.393>
- Barnes, H. (1997). Thixotropy-A review. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 1-33.
- Barnes, H., Hutton, J., & Walters, K. (1989). *An introduction to rheology*. Elsevier.
- Cámara Argentina de Laboratorios Independientes, Bromatológicos Ambientales y Afines (CALIBA). (Enero de 2014). *Análisis de hidrocarburos totales de petróleo, comparación de los métodos mas comúnmente empleados*. Obtenido de https://www.caliba.org.ar/inicio/notatecnica_ene_2014.pdf
- de Oliveira, C. B., Souza, W. J., Santana, C. F., Santana, C. C., Dariva, C., Franceschi, E., . . . Santos, A. F. (2018). Rheological Properties of Water-in-Brazilian Crude Oil Emulsions: Effect of Water Content, Salinity, and pH. (8880-8890, Ed.) *Energy & Fuels*, 32(8). doi:10.1021/acs.energyfuels.8b01227
- Dong, B., Qin, Z., Wang, Y., Zhang, J., Xu, Z., Liu, A., & Guo, X. (2022). Investigating the Rheology and Stability of Heavy Crude Oil-in-Water Emulsions Using APG08 Emulsifiers.
- Dong, X., Liu, H., Wang, Q., Pang, Z., & Wang, C. (2013). Non-Newtonian flow characterization of heavy crude oil in porous. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 3, 43-53. doi:DOI 10.1007/s13202-012-0043-9
- EP Petroecuador. (2013). *El petróleo en el Ecuador: la nueva era petrolera*. Obtenido de <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/El-Petr%C3%B3leo-en-el-Ecuador-La-Nueva-Era.pdf>
- F. I. (2016). *Model 35 Viscometer Instruction Manual*.

- Farah, M. A., Oliveira, R. C., Caldas, J. N., & Rajagopal, K. (25 de Junio de 2005). Viscosity of water-in-oil emulsions: Variation with. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 48(3-4), 169-184. doi:DOI: 10.1016/j.petrol.2005.06.014
- Faris, H. A., Sami, N. A., Abdulrazak, A. A., & Sangwai, J. S. (2015). The Performance of Toluene and Naphtha as Viscosity and Drag Reducing Solvents for the Pipeline Transportation of Heavy Crude Oil.
- Fisher Scientific. (2023). *Non-Newtonian Fluids: Unveiling the fascinating World of Flowing Matter*. Obtenido de Lab Reporter: https://www.fishersci.fi/fi/en/lab-reporter/2023/issue-4/non-newtonian-fluids.html?cid=WEB_INE_20230522_82PBNH
- Frigaard, I. A., Paso, K. G., & de Souza Mendes, P. R. (20 de Febrero de 2017). Bingham's model in the oil and gas industry. *Rheologica Acta*, 259-282. doi:DOI 10.1007/s00397-017-0999-y
- García, B., & Saraji, S. (2019). Mixed in-situ rheology of viscoelastic surfactant solutions using a hyperbolic geometry. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 56-65.
- Gary, J. H., & Handwerk, G. E. (1975). *Petroleum Refining: Technology and Economics*. New York: Marcel Dekker.
- Ghannam, M. T., Hasan, S. W., Abu-Jdayil, B., & Esmail, N. (2012). Rheological properties of heavy & light crude oil mixtures for improving flowability.
- Giraldo, A., Martinis, M., Alves, E. C., Da Silva, D. X., & Telis-Romero, J. (2011). Propiedades físico-químicas del biodisel. *Pesticidas: Revista de Ecotoxicología e Medio Ambiente*, 55-72.
- Global Energy Monitor. (s.f). *Crudos Pesados Oil Pipeline*. Obtenido de GEM Wiki: https://www.gem.wiki/Crudos_Pesados_Oil_Pipeline
- Gomaa, S., G., K. S., & A.N., E.-h. (2024). Enhanced heavy and extra heavy oil recovery: Current status and new trends. *Petroleum*, 399-410.
- Guo, B., Lyons, W., & Ghamlambor, A. (2007). *Petroleum Production Engineering: A Computer-Assisted Approach*. Gulf Professional Publishing.
- H, R., Ewoldt, Johnston, M. T., & Caretta, L. M. (2014). Experimental challenges of shear rheology: how to avoid bad data.
- Hansen, C. P., Pereyra, V., & Scherer, G. (2013). *Least Squares Data Fitting with Applications*.
- Hao, W. (2020). A gradient descent method for solving a system of nonlinear equations. *ELSEVIER*.

- Hasan, S. (2007). *Rheology of Heavy Crude Oil and Viscosity Reduction for Pipeline Transportation*.
- Hasan, S. W., Ghannam, M. T., & Esmail, N. (2010). Heavy crude oil viscosity reduction and rheology for pipeline transportation.
- Hu, & Haoyang. (2009). Improving the efficiency of diluents for heavy oil pipeline transportation.
- Hu, R., Tang, S., Mpelwa, M., Jiang, Z., & Feng, S. (2021). Research progress of viscoelastic surfactants for enhanced oil recovery. *Energy & Environment (SAGE)*, 39(4), 1324-1348. doi:10.1177/0144598720980209
- King, G. (s.f.). *e-education.psu.edu*. Obtenido de <https://www.e-education.psu.edu/png301/node/557>
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares.
- Livescu, S. (2012). Mathematical modeling of thixotropic drilling mud and crude oil flow in wells and pipelines-A review.
- Livescu, S. (2012). *Mathematical modeling of thixotropic drilling mud and crude oil flow in wells and pipelines-A reviews*.
- Luo , P., Yang, C., & Gu, Y. (2007). Enhanced solvent dissolution into in-situ upgraded heavy oil under different pressures.
- Magnon, E., & Cayeux, E. (2021). Precise Method to Estimate the Herschel-Bulkley Parameters from Pipe Rheometer Measurements.
- Marín Velásquez, T. D. (2020). Modelo matemático para la predicción de la viscosidad de petróleo crudo mediano de campos productores del Estado Monagas, Venezuela. *CINTEX*, 25(1), 13-20. doi:10.33131/24222208.327
- Marquardt, D. W. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters.
- Mohammadi, S., Sobati, M. A., & Sadeghi, M. T. (2019). Viscosity Reduction of Heavy Crude Oil by Dilution Methods: New Correlations for the Prediction of the Kinematic Viscosity of Blends. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 8(1), 60-77. doi:10.22050/IJOGST.2018.97887.1405
- Morales Salazar, J. P. (2024). *Desarrollo y solución numérica del modelo matemático de Herschel-Bulkley para calcular la hidraulica en los pozos petroleros*.
- Mortazavi-Manesh, S., & Shaw, J. M. (2016). Effect of diluents on the rheological properties of Maya crude oil.

- Narro, G. M., Pozos Vazquez, C., Núñez Delgado, A., Morán Medellín, D., & Lara Zárate, V. E. (2020). Heavy crude oil viscosity reduction by dilution with hydrocarbons obtained via pyrolysis of polypropylene and polystyrene.
- Nikolaev, A., Goluntsov, A., & Plotnikova, K. (2026). physically based rheological model for predicting the flow behavior of heavy and light crude oil mixtures.
- Oates, K., Krause, W., Jones, R., & Colby, R. (2005). Rheopexy of Synovial Fluid and Protein Aggregation. *Journal of Rheology*.
- OCP Ecuador. (s.f). *Nuestra historia*. Obtenido de OCP Ecuador: <https://www.ocpecuador.com/nuestra-historia/>
- OCP Ecuador. (s.f). *OCP Ecuador*. Obtenido de OCP Ecuador: <https://www.ocpecuador.com/>
- P. Bassane, J. F., S. Sad, C. M., C. Neto, D. M., D. Santos, F., Silva, M., C. Tozzi, F., . . . Lacerda Jr, V. (2016). Study of the effect of temperature and gas condensate addition on the viscosity of heavy oils.
- Paladines, A. (2005). *Los recursos no renovables del Ecuador: Base para la planificación y ordenamiento*.
- Palou, R. M., Mosqueira, M. d., Zapata-Rendón, B., Mar-Juárez, E., Bernal-Huicochea, C., Clavel-López, J. d., & Aburto, J. (2010). Transportation of heavy and extra-heavy crude oil by pipeline: A review. *ELSEVIER*.
- Petróleos de América. (s.f.). *Qué es el petróleo*. Petroleos de America.
- Powers, J. M. (2023). *Mechanics of Fluids*.
- Rehm, B., Haghshenas, A., Paknejad, A., Al-Yami, A., Hughes, J., & Schubert, J. (2012). En *Underbalanced Drilling: Limits and Extremes* (págs. 39-108).
- Remolina-Campos, S. A., Espitia-Castellanos, J., Luna-Cáceres, C. A., & Patiño-Reyes, É. J. (2019). Una mirada al desarrollo de aditivos reductores de viscosidad y sus aplicaciones en el transporte de crudos pesados. *Revista Facultad de Ingeniería*, 32(1). doi:10.18273/revion.v32n1-2019003
- Rojas, J., & Castillo, A. (2017). Análisis de pruebas de presión en yacimientos naturalmente fracturados. *Revista Fuentes. el Reventón Energético*, 33-42.
- Saeedi Dehaghani, A. H., & Hasan Badizad, M. (2016). Experimental study of Iranian heavy crude oil viscosity. *Petroleum*.
- Schlumberger. (15 de 03 de 2016). Obtenido de slb: <https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-rheology>

- Schumberger. (s.f). *Análisis SARA*. Obtenido de Energy glossary:
https://glossary.slb.com/es/terms/s/sara_analysis
- Shell. (19 de Noviembre de 2025). *Civil jet fuel grades*. Obtenido de Shell:
<https://www.shell.com/business-customers/aviation/aviation-fuel/civil-jet-fuel-grades.html>
- Speigth, J. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum*. CRC Press.
- State, P. (4 de Agos de 2004). *psu*. Obtenido de PennState College of Engieneering:
https://www.me.psu.edu/cimbala/Learning/Fluid/Introductory/what_is_fluid_mechanics.htm
- Stratiev, D., Shishkova, I., Tankov, I., & Pavlova, A. (2019). Challenges in characterization of residual oils: A review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 227-250.
- Triantafillopoulos, N. (2000). *Measurement of Fluid Rheology and Interpretation of Rheograms*.
- Vera Grunauer, X. F. (2021). INFORME ANUAL DEL PETENCIAL HIDROCARBURIFERO DEL ECUADOR.
- Wong, S. F., Law, M. C., Samyudia, Y., & Dol, S. S. (20 de Septiembre de 2015). Rheology Study of Water-in-Crude Oil Emulsion. *Chemical Engineering Transactions*, 45, 1411-1416. doi:10.3303/CET1545236
- Zhu, M., Zhong, H., Li, Y., Zeng, C., & Gao, Y. (2015). Research on viscosity-reduction technology by electric heating. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*.

ANEXOS

ANEXO A

Datos reológicos del petróleo Alfa y Omega a diferentes temperaturas

Tabla A1. Variables reológicas de petróleo Alfa a 25°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
104.7345	2050	5.109
206.9145	2025	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A2. Variables reológicas de petróleo Alfa a 30°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
88.13025	1725	5.109
173.706	1700	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A3. Variables reológicas de petróleo Alfa a 35°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
81.744	1600	5.109
163.488	1600	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A4. Variables reológicas de petróleo Alfa a 40°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
22.9905	450	5.109
43.4265	425	10.218
659.061	387	170.3
1318.122	387	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A5. Variables reológicas de petróleo Alfa a 50°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
15.327	300	5.109
25.545	250	10.218
385.7295	226.5	170.3
751.023	220.5	340.6
1106.0985	216.5	510.9
-	-	1021.8

Tabla A6. Variables reológicas de petróleo Alfa a 60°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
10.218	200	5.109
17.8815	175	10.218
214.578	126	170.3
424.047	124.5	340.6
623.298	122	510.9
1231.269	120.5	1021.8

Tabla A7. Variables reológicas de petróleo Omega a 25°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
112.398	2200	5.109
224.796	2200	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A8. Variables reológicas de petróleo Omega a 30°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
109.8435	2150	5.109
214.578	2100	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A9. Variables reológicas de petróleo Omega a 35°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
107.289	2100	5.109
204.36	2000	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A10. Variables reológicas de petróleo Omega a 40°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
74.0805	1450	5.109
137.943	1350	10.218
-	-	170.3
-	-	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A11. Variables reológicas de petróleo Omega a 50°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
51.09	1000	5.109
91.962	900	10.218
638.625	375	170.3
1231.269	361.5	340.6
-	-	510.9
-	-	1021.8

Tabla A 12. Variables reológicas de petróleo Omega a 60°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
22.9905	450	5.109
33.2085	325	10.218
372.957	219	170.3
702.4875	206.25	340.6
1026.909	201	510.9
-	-	1021.8

Tabla A13. Variables reológicas de petróleo Omega a 70°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
14.04975	275	5.109
22.9905	225	10.218
255.45	150	170.3
475.137	139.5	340.6
702.4875	137.5	510.9
1328.34	130	1021.8

ANEXO B

Datos reológicos del diluyente Diésel-1 y Turbosina a diferentes temperaturas

Tabla B1. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 25°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.127725	2.5	5.109
0.25545	2.5	10.218
4.2575	2.5	170.3
8.515	2.5	340.6
12.7725	2.5	510.9
25.545	2.5	1021.8

Tabla B2. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 30°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.127725	2.5	5.109
0.25545	2.5	10.218
4.2575	2.5	170.3
8.515	2.5	340.6
12.7725	2.5	510.9
25.545	2.5	1021.8

Tabla B3. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 35°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.106969688	2.09375	5.109
0.213939375	2.09375	10.218
3.56565625	2.09375	170.3
7.1313125	2.09375	340.6
10.69696875	2.09375	510.9
21.3939375	2.09375	1021.8

Tabla B4. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 40°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.103074075	2.0175	5.109
0.20614815	2.0175	10.218
3.4358025	2.0175	170.3
6.871605	2.0175	340.6
10.3074075	2.0175	510.9
20.614815	2.0175	1021.8

Tabla B5. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 50°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.103074075	2.0175	5.109
0.20614815	2.0175	10.218
3.4358025	2.0175	170.3
6.871605	2.0175	340.6
10.3074075	2.0175	510.9
20.614815	2.0175	1021.8

Tabla B6. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 60°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.103074075	2.0175	5.109
0.20614815	2.0175	10.218
3.4358025	2.0175	170.3
6.871605	2.0175	340.6
10.3074075	2.0175	510.9
20.614815	2.0175	1021.8

Tabla B7. Variables reológicas del diluyente Diésel-1 a 70°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.103074075	2.0175	5.109
0.20614815	2.0175	10.218
3.4358025	2.0175	170.3
6.871605	2.0175	340.6
10.3074075	2.0175	510.9
20.614815	2.0175	1021.8

Tabla B8. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 25°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.130918125	2.5625	5.109
0.26183625	2.5625	10.218
4.3639375	2.5625	170.3
8.727875	2.5625	340.6
13.0918125	2.5625	510.9
26.183625	2.5625	1021.8

Tabla B9. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 30°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.130918125	2.5625	5.109
0.26183625	2.5625	10.218
4.3639375	2.5625	170.3
8.727875	2.5625	340.6
13.0918125	2.5625	510.9
26.183625	2.5625	1021.8

Tabla B10. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 35°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.124723463	2.44125	5.109
0.249446925	2.44125	10.218
4.15744875	2.44125	170.3
8.3148975	2.44125	340.6
12.47234625	2.44125	510.9
24.9446925	2.44125	1021.8

Tabla B11. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 40°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.1134198	2.22	5.109
0.2268396	2.22	10.218
3.78066	2.22	170.3
7.56132	2.22	340.6
11.34198	2.22	510.9
22.68396	2.22	1021.8

Tabla B12. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 50°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.1134198	2.22	5.109
0.2268396	2.22	10.218
3.78066	2.22	170.3
7.56132	2.22	340.6
11.34198	2.22	510.9
22.68396	2.22	1021.8

Tabla B13. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 60°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.1134198	2.22	5.109
0.2268396	2.22	10.218
3.78066	2.22	170.3
7.56132	2.22	340.6
11.34198	2.22	510.9
22.68396	2.22	1021.8

Tabla B14. Variables reológicas del diluyente Turbosina a 70°C

Esfuerzo Cortante (dyn/cm ²)	Viscosidad Aparente (cP)	Tasa de corte (s ⁻¹)
0.1134198	2.22	5.109
0.2268396	2.22	10.218
3.78066	2.22	170.3
7.56132	2.22	340.6
11.34198	2.22	510.9
22.68396	2.22	1021.8

ANEXO C

Ajuste de modelos reológicos a los puntos pares experimentales del crudo Alfa y Omega a temperaturas de 60°C y 70°C en función de la tasa de corte

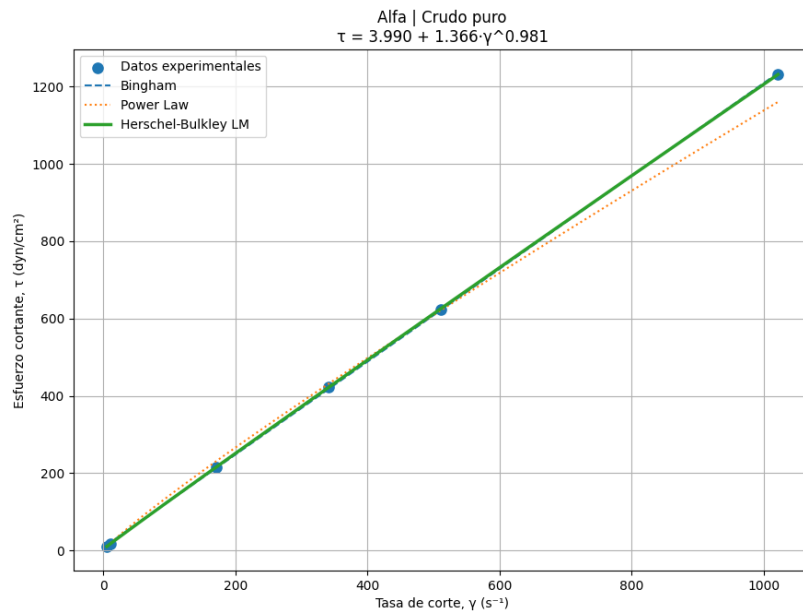


Figura C1. Ajustes de modelos reológicos a los puntos pares del petróleo Alfa 60°C

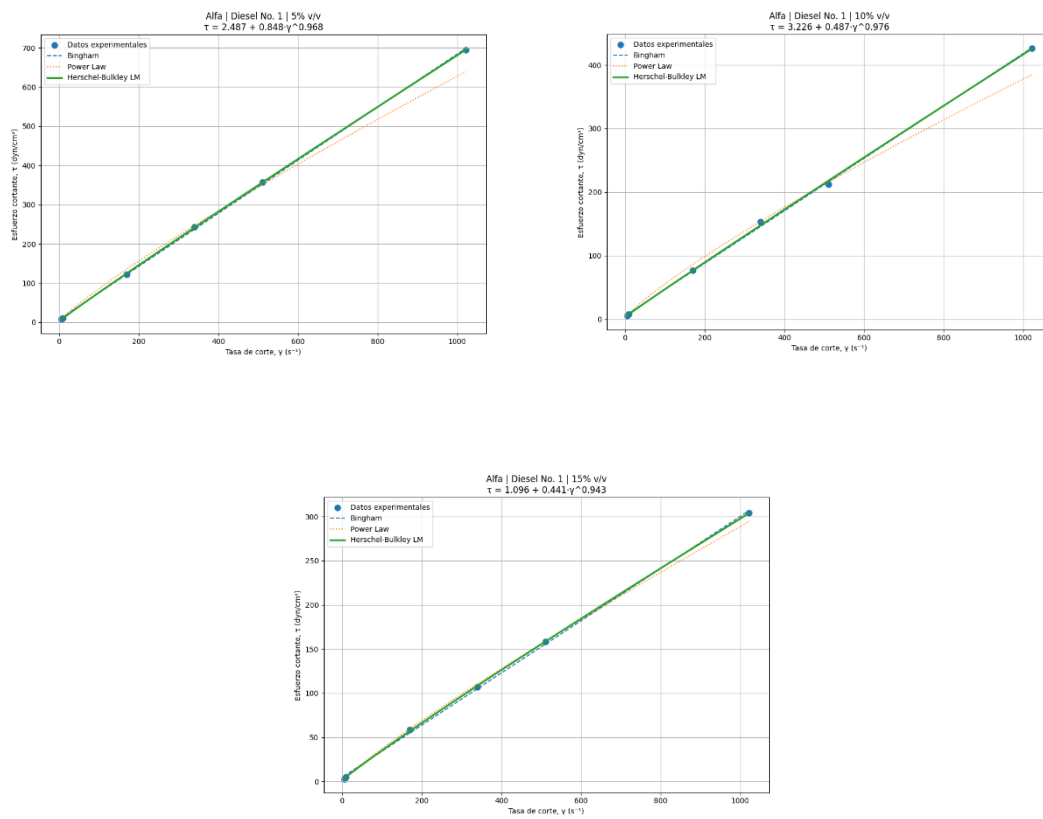


Figura C2. Ajustes de modelos reológicos a los puntos pares del petróleo Alfa-Diésel-1 60°C a diferentes concentraciones

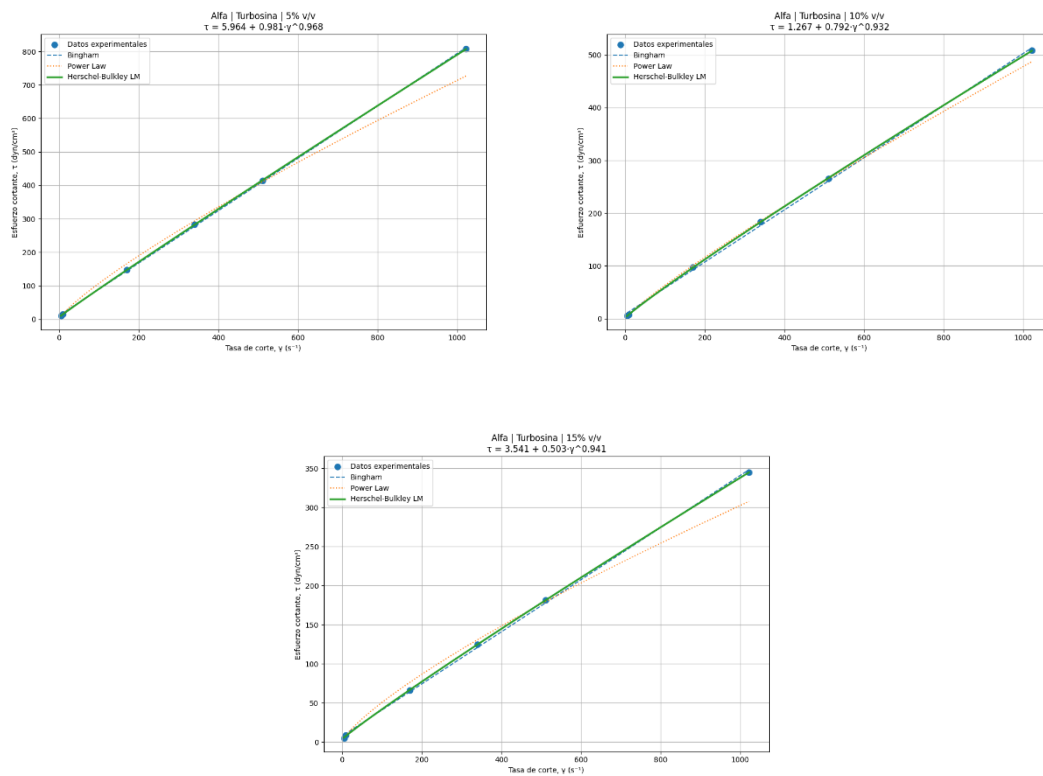


Figura C 3. Ajustes de modelos reológicos a los puntos pares del petróleo Alfa-Turbosina 60°C a diferentes concentraciones

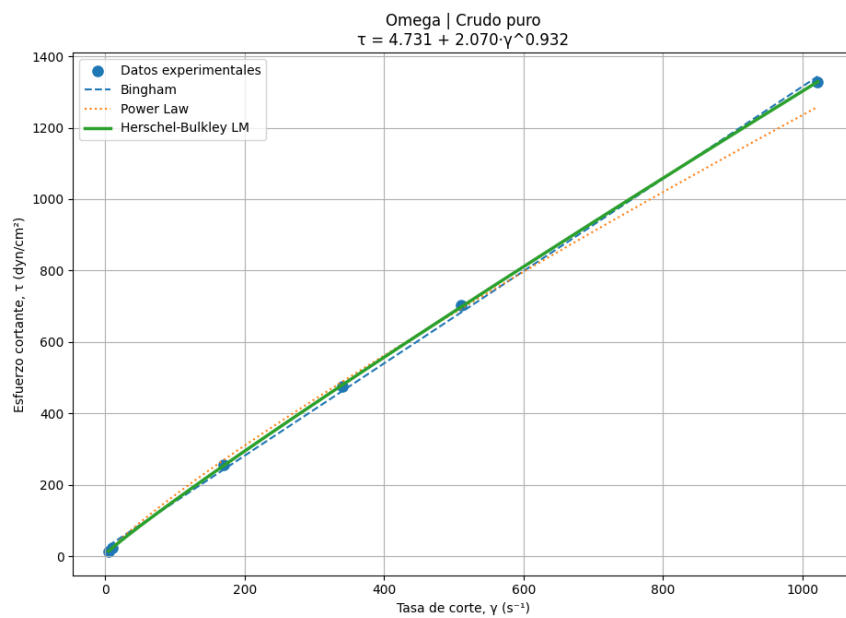


Figura C4. Ajustes de modelos reológicos a los puntos pares del petróleo Omega 70°C

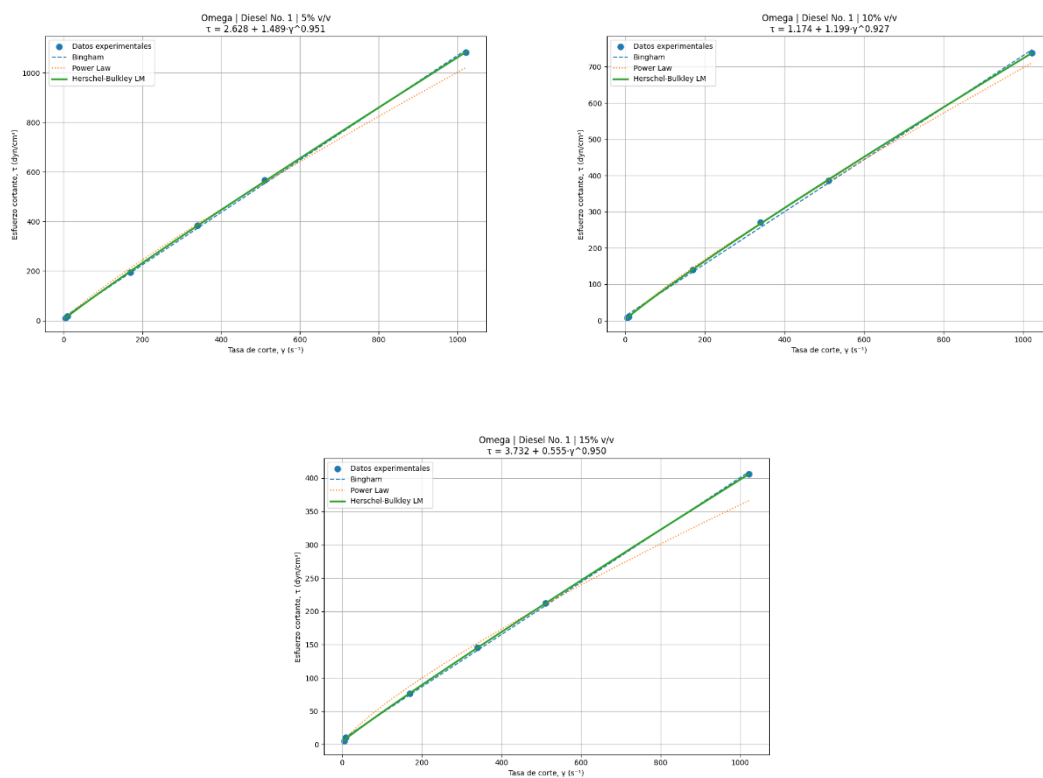


Figura C5. Ajustes de modelos reológicos a los puntos pares del petróleo Omega-Diésel-1 70°C a diferentes concentraciones

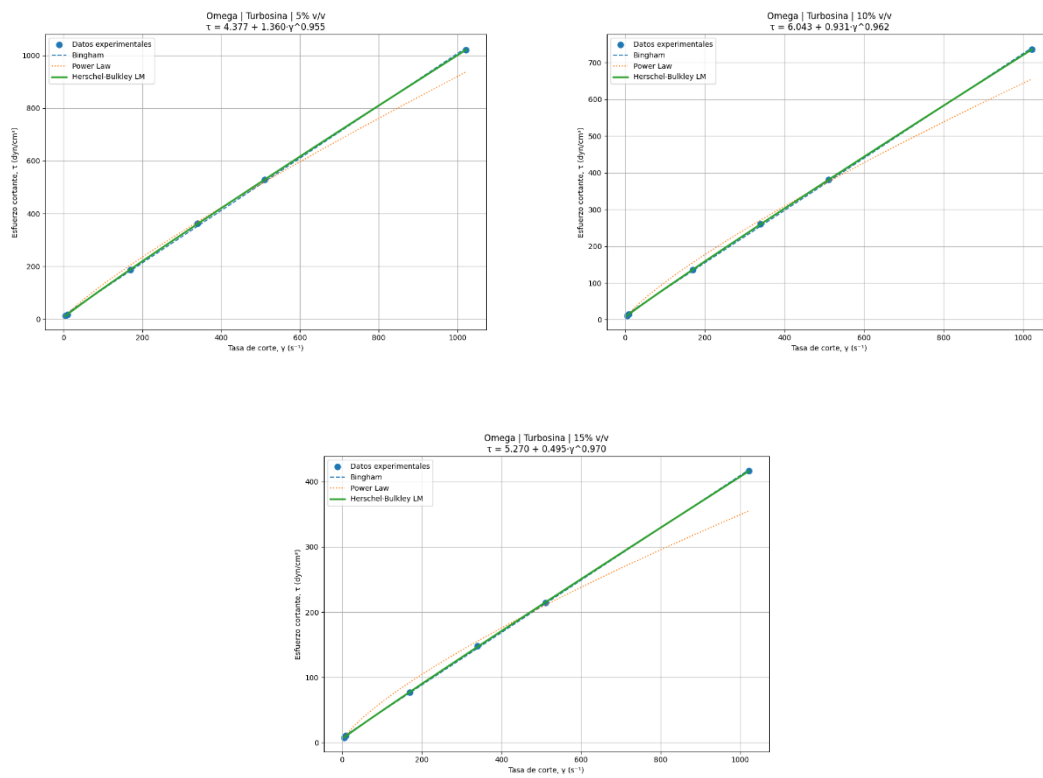


Figura C6. Ajustes de modelos reológicos a los puntos pares del petróleo Omega-Turbosina 70°C a diferentes concentraciones

ANEXO D

Registros fotográficos del Laboratorio de Mecánica de Fluidos



Figura D1. Diluyente vertido en una probeta graduada 500 mL para diferentes concentraciones



Figura D2. Petróleo pesado vertido en un vaso precipitado de 500 mL



Figura D3. Mezcla de diluyente y petróleo pesado en un vaso del equipo turbomix

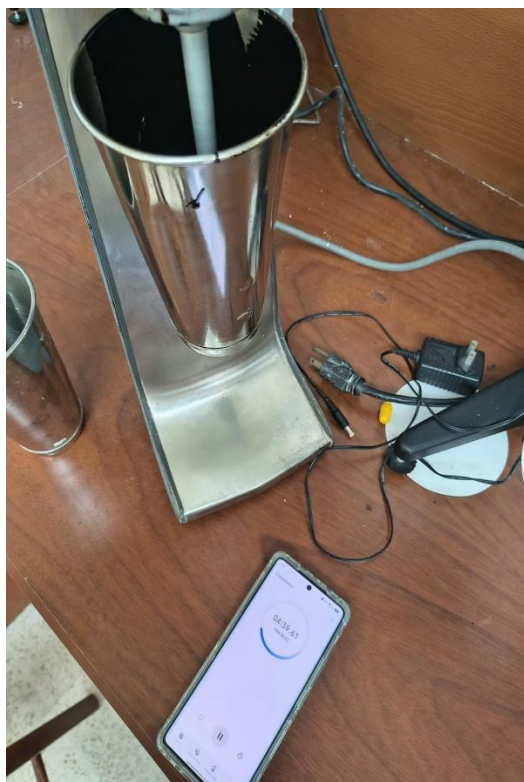


Figura D4. Mezclando Petróleo pesado y diluyente durante 5 minutos en el equipo turbomix



Figura D5. Mezcla de petróleo pesado y diluyente vertida en un vaso precipitado del equipo de Viscosímetro de Fann35A



Figura D6. Exhibición de mezclas de petróleo pesado y diluyente a diferentes concentraciones 5, 10 y 5 %v/v en vasos precipitado



Figura D7. Calentando el Sistema petróleo pesado y diluyente en un plato calentador a diferentes temperaturas



Figura D8. Lectura de Dial del equipo de Viscosímetro de Fann35A a cierta temperatura de la mezcla del petróleo pesado y diluyente