



FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA

**DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS
DE EMULSIONES DE GLICERINA Y AGUA
MEDIANTE EL USO DEL REOMETRO DIGITAL IKA
ROTAVISC LO-VI**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

PROF. GUÍA: CARLOS ZAMBRA
PROF. ASESOR: CRISTOBAL MONTALBA

DIEGO ALONSO CASANOVA NAVIA

**CURICÓ - CHILE
2022**

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

AGRADECIMIENTOS

Como agradecimiento a mi familia, a mi madre Lucy Navia, mi padre Guillermo Casanova, mis hermanas Melissa Casanova, Constanza Casanova y Lucy Casanova por apoyarme en tomar este camino universitario en una carrera enfocada al desarrollo e innovación.

A mis abuelas Lucy Ayala y Victoria Astorga que siempre me inculcaron desde mi infancia los mejores valores que pudieron compartirme como persona, esfuerzo constante, estudio y enfoques claros en los que me invitaron siempre a soñar, pero con los pies en la tierra.

Agradecimientos a mi difunto abuelo Guillermo Casanova con el que tenía más cosas en común de lo que ambos pensábamos.

Agradecimientos a mi tío Álvaro Casanova con quien revivimos afortunadamente junto a mi padre la historia del apellido Casanova.

A mis primas y primos en general, por quererme y valorarme tanto, por siempre estar ahí apoyándome emocionalmente a pesar de ser el mayor de todos los primos, siempre estuvieron apoyándome lo más que pudieron.

A mi tía Cecilia que, en tiempos de oscuridad, intentó entregar toda la luz que pudo. A mi tía Luisa Casanova que siempre ha estado para escucharme, guiarme y apoyarme. A mi tía Rosa Casanova que siempre estuvo preocupada y será la más feliz con mi egreso.

A mi tío Rodrigo que no veo hace tiempo, pero sigue el cariño, apoyo y recuerdos que tengo con él de manera intacta.

Agradecimientos especiales a mi polola Raquel Palma, quien fue la única ajena a mi familia en apoyarme y creer en mí siempre, motivándome a creer en mis habilidades y ayudándome a reencontrarme conmigo mismo.

Agradecimientos a Nicolás Saavedra de la Universidad de Concepción, quien tuvo la amabilidad de compartirme sus conocimientos de reología, que fueron buena guía para orientar los fundamentos de esta memoria.

Agradecimientos a Carlos Zambra, Karin Saavedra, Jorge Hinojosa, Ambrosio Olivos, Cristóbal Montalba, Jorge Morales, Gonzalo Salinas, Fernanda Fuentes, Linda Canales y Alejandra Cabrera que aplicaron toda su capacidad docente y humana en la formación de mi proceso académico en condiciones adversas ya sean con o sin pandemia.

Agradecimientos a mis amistades favoritas, Verónica Vega, Carlos Drews, Sebastian Valenzuela, Francisca Bugueño, Arlyn Kreithler, Jhonny Helmo, Barbara Maldonado y Juan Felipe González, que aunque ya no nos vemos como antes, siempre aparecieron en el momento preciso para darme su apoyo, los quiero un montón.

Agradecimientos a mi tropa de amistades de la universidad, partiendo por Cecilia Opazo, Yanis Ramírez, Daniel Romero, Ricardo Hernandez. Jorge León, Sebastián Verdugo y Sebastian Castillo con quienes compartimos alegrías, tristezas y años valiosos de nuestras vidas. Les deseo todo el éxito y alegría posible e imposible.

Agradecimientos fraternos y sororos a mis hermanas y hermanos de la vida, hijos de nuestra tía viuda y en especial a las y los sobrinos de nuestra amada tía Fanny. Que el eslabón que nos une, jamás se rompa.

DEDICATORIA

Dedicado al profesor Wilson Flores, quien, sin conocerme, me dio un apoyo académico, profesional, personal y humano gigantesco en el momento que más lo necesité.

Dedicado a mi polola y amiga Raquel Palma quien me apoyó con todo lo que pudo y sabía para que lograra sacar adelante esta carrera.

Dedicado a mi familia, a mi gata Kitty y mi perrito Ying que me cuidan y se preocupan por mi siempre.

Dedicado a mis difuntos amigos Sabrina, Panch Fuzz Díaz, Chelo y Flavio Ponce que no volveré a ver jamás, pero que se quedaron conmigo por siempre en los recuerdos de mi carrera universitaria y con quienes revivo momentos con cada canción que compartimos alguna vez.

Dedicado a nuestro hermoso grupo de amigas y amigos.

Sin ustedes esto no hubiese sido posible, de ninguna manera.

RESUMEN

La memoria aborda el estudio en 9 distintas concentraciones en función de 4 tipos de temperatura, mediante procedimiento experimental para evaluar datos de viscosidad en emulsiones de glicerina técnica (marca Winkler) con agua destilada, estos datos son obtenidos mediante la utilización de un reómetro de husillos giratorios de la marca IKA modelo LO-VI utilizando los husillos SP-1 y SP-2 de su set de husillos estándar.

Los datos de viscosidad experimentales mediante reómetro giratorio fueron comparados con datos de literatura para validar el procedimiento experimental y comprender si los valores de viscosidad obtenidos para cada concentración tienen relación con otros estudios y tabla de propiedades.

Al comparar los datos experimentales con datos de literatura de las viscosidades, se procede a evaluar las emulsiones mediante modelos matemáticos que describen su comportamiento reológico. Los modelos matemáticos empleados son Ley de potencia, Herschel-Bulkley y Casson, además de evaluar el comportamiento de la emulsión en función de su temperatura obteniendo con ello su viscosidad aparente.

Mediante los modelos matemáticos se obtienen parámetros reológicos que describen características reológicas del fluido y mediante la viscosidad aparente relacionamos el comportamiento experimental en función de las temperaturas mediante representación gráfica para cada concentración de emulsiones.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	ii
DEDICATORIA.....	iv
RESUMEN	v
INDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxiii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. ANTECEDENTES.....	2
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA.....	4
1.4. OBJETIVOS.....	4
1.4.1. Objetivo general.....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. RESULTADOS ESPERADOS	5
1.6. METODOLOGÍA	5
1.6.1 Rangos del proyecto.....	8
1.6.2 Insumos y materiales asociados a las actividades	8
Creación de emulsiones	8
Control de temperatura	9
Creación de datos Reológicos	9
Registro audiovisual.....	9
Creación de datos reológicos mediante viscosímetro giratorio y un termorregulador.	9

1.6.3	Planificación mediante Carta Gantt.....	10
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....		11
2.1.	estado del arte.....	12
2.1.1.	Viscosidad.....	13
2.1.2.	Viscosidad dinámica.....	15
2.1.3.	Viscosidad aparente.....	15
2.1.4.	Viscosidad cinemática.....	15
3.	Unidades.....	16
3.1.1.	Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico.....	19
3.1.2.	Reómetros rotacionales.....	20
3.1.3.	Reómetros de cilindros concéntricos.....	20
3.1.4.	Reómetros de husillos rotativos.....	20
3.1.5.	Husillos o Splinde.....	21
3.1.6.	Glicerina.....	21
3.1.7.	Emulsiones.....	22
3.1.8.	Estudios reológicos.....	22
3.1.9.	Fluidos Newtonianos.....	23
3.1.10.	Fluidos No Newtonianos.....	23
3.1.11.	Fluido independiente del tiempo de carácter No Newtonianos Dilatante.....	24
3.1.12.	Fluido independiente del tiempo de carácter No Newtonianos Bingham.....	25
3.1.13.	Fluido independiente del tiempo de carácter No Newtonianos Pseudoplástico	25
3.1.14.	Fluido dependiente del tiempo de carácter No Newtonianos Toxitrópicos....	25
3.1.15.	Fluido dependiente del tiempo de carácter No Newtonianos Reopéticos....	25
3.1.16.	Fluido dependiente del tiempo de carácter No Newtonianos Viscoelástico...	26

3.1.17.	Parámetros reológicos en fluidos no Newtonianos.....	26
	Punto de Cedencia (τ_y).....	26
	Índice de flujo (n).....	26
	Índice de consistencia (k).....	27
3.2.	modelos matemáticos para fluidos.....	27
3.2.1.	Ley de la potencia.....	27
3.2.2.	Modelo de Bingham.....	28
3.2.3.	El modelo de Herschel Bulkley	28
3.2.4.	El modelo de Casson.....	29
3.2.5.	Efecto de la temperatura para emulsiones	30
3.3.	Obtención de parámetros reológicos.....	30
2.3.1	Obtención de parámetros de Ley de la potencia.....	31
2.3.2	Obtención de parámetros de Casson	32
2.3.3	Obtención de parámetros de Herschel Bulkley	33
3.4.	error estadístico.....	33
	Error absoluto (EA).....	33
	Error medio (EME).....	34
	Error cuadrático (EC).....	34
	Error cuadrático medio (ECM).....	34
	Error estándar (RSME).....	35
	Error R ajustado o R²	35
	Error chi cuadrado X²	36
	Intervalos de confianza.....	36
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....		38
4.	Desarrollo	39

4.1.1. Procedimiento de Laboratorio para realizar estudio reológico.....	39
Describir procedimiento de laboratorio para realizar estudio reológico.	42
Crear Reogramas mediante datos reológicos.....	43
Evaluar los datos mediante los modelos matemáticos Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson que rigen fluidos No Newtonianos a diferentes temperaturas y velocidad de giro RPM del reómetro ROTAVISC LO VI.....	43
Estudiar modelos matemáticos de Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson para el estudio reológico que rigen fluidos No Newtonianos.....	44
Cronograma de actividades.....	46
Limpieza y preparación de la zona de trabajo e implementos a utilizar (Etapa 0)..	46
Preparación de implementos electrónicos. (Etapa 1).....	46
Preparación de Mezcla o Emulsión. (Etapa 2).....	46
Montaje para análisis de mezcla o emulsión. (Etapa 3).....	47
Control de Temperatura. (Etapa 4).....	47
Toma de datos. (Etapa 5).....	47
Evaluación de datos. (Etapa 6).....	48
Graficar datos. (Etapa 7).....	48
Evaluar error de datos. (Etapa 8).....	49
Determinación de parámetros reológicos. (Etapa 9).....	49
Análisis estadístico. (Etapa 10).....	50
Resultados y discusión de cada paso (desde el paso 1 al 10). (Etapa 11).....	50
Conclusiones. (Etapa 12).....	51
4.1.2. Comparación entre los datos de viscosidad experimentales y fundamentos de literatura.....	51
4.1.3. Creación de Reogramas que describan el comportamiento de datos reológicos	54
Dimensionamiento de husillo y relación con el esfuerzo de corte.....	54

Viscosidad	54
Velocidad de corte $\dot{\gamma}1s$ vs esfuerzo de corte τPa	55
4.1.4. Obtención de parámetros reológicos mediante modelos matemáticos Ley de la Potencias, Herschel – Bulkley y Casson.....	57
Ley de la potencia.....	57
Casson	58
Herschel Bulkley.....	59
4.1.5. Análisis estadístico	60
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
CAPÍTULO 4. Análisis de resultados.....	62
4.1 Comportamiento reológico de las emulsiones Glicerina/ % agua.....	62
4.2 Comportamiento reológico del coeficiente de consistencia “k” en función de las temperaturas.	66
4.3 Comportamiento reológico del índice de flujo “n” en función de las temperaturas. 70	
4.4 Comportamiento de la viscosidad aparente en función de las temperaturas.....	74
4.5 Análisis estadístico.....	75
CONCLUSIONES.....	77
REFERENCIAS	80
ANEXO 1: Imágenes.....	86
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada).....	97
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada).....	99
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada).....	101

Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada).....	103
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada).....	105
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada).....	107
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada).....	108
ANEXO 2: Tablas	120
4.5.1 Parámetros reológicos.....	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Diagrama de flujo “Etapas de entrada y proceso”	6
Figura 1.2: Carta Gantt.....	10
Figura 2.1: Tipos de Husillo del equipo SP-1 (Technical Information for Keithley, n.d.).....	21
Figura 2.2: Curvas de viscosidad para un fluido Newtoniano a) (τ vs $\dot{\gamma}$) b) (μ vs $\dot{\gamma}$) (Burgos, 2018).....	23
Figura 2.3: Curvas de viscosidad para fluidos No Newtonianos.....	24
Figura 1.1: Diagrama de flujo "Creación de datos reológicos mediante viscosímetro giratorio y un termorregulador	42
Figura 1.2: Diagrama de flujo "Creación de Reogramas mediante datos reológicos”	43
Figura 1.3: Diagrama de flujo “Evaluación de los datos mediante los modelos matemáticos Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson que rigen fluidos No Newtonianos a diferentes temperaturas y velocidad de giro RPM del reómetro ROTAVISC LO VI”	44
Figura 1.4: Diagrama de flujo "Estudio de modelos matemáticos de Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson para el estudio reológico que rigen fluidos No Newtonianos" ..	45
Figura Anexo 4.1 Reómetro ROTAVISC LO VI.....	86
Figura Anexo 4.2 Husillos para Reómetro ROTAVISC LO VI.....	86
Figura Anexo 4.3 Soporte para Termómetro y Protección del husillo.....	87
Figura Anexo 4.4 Reómetro ROTAVISC LO VI instalado en la fuente termorreguladora y muestra de 200 ml de Glicerina.....	87
Figura Anexo 4.5 Reómetro ROTAVISC LO VI instalado en la fuente termorreguladora con una temperatura inicial de 25° C	88
Figura Anexo 4.6 Configuración de Unidades para el análisis mediante Reómetro ROTAVISC LO VI.....	88
Figura Anexo 4.7 Valores de viscosidad obtenidos por pantalla mediante análisis a los 33 segundos y con una velocidad de giro de husillo de 50 RPM.....	89
Figura Anexo 4.8 Gráfica de Viscosidad vs Velocidad de giro de husillo en RPM obtenida por pantalla.....	89

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfica 1.1 Comportamiento reológico de los fluidos mediante relación entre "Viscosidad aparente vs Velocidad de corte" (Darlington, 2021)	3
Gráfica 1.2: Comportamiento reológico de los fluidos mediante relación de "Esfuerzo cortante vs Velocidad de corte" (Darlington, 2021).....	3
Gráfica 3.1 Reograma de referencia “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C.(Wagner et al., 2012).....	52
Gráfica 3.2 Reograma literatura de referencia “ Rheometer Data - Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 80% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C. (Wagner et al., 2012).....	52
Gráfica 3.3 Reograma literatura de referencia “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C.(Barnes, 2000).....	53
Gráfica 3.4 Reograma literatura de referencia 2 “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C.(Department of Meteorology, 2018).....	53
Gráfica 3.5 Reograma Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.....	56
Gráfica 3.5 Reograma Ley de potencia Logaritmo de Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.....	57
Gráfica 3.5 Reograma Casson Raíz cuadrada de Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.....	58
Gráfica 3.5 Reograma Herschel – Bulkley Logaritmo Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.....	59
Gráfica 4.1 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a	

temperatura constante de 20°C. Literatura reómetro (Wagner et al., 2012), Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018)....	62
Gráfica 4.2 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 30°C. Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).....	63
Gráfica 4.3 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 40°C. Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).....	64
Gráfica 4.4 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 50°C. Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).....	65
Gráfica 4.5 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.s ⁿ) Ley de la potencia vs Temperatura”	67
Gráfica 4.6 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.s ⁿ) Herschel - Bulkley vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.....	68
Gráfica 4.7 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.s ⁿ) Casson vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.....	69
Gráfica 4.8 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.s ⁿ) Ley de la potencia vs Temperatura”	71
Gráfica 4.9 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.s ⁿ) Herschel - Bulkley vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.....	72
Gráfica 4.10 Reograma de Coeficiente de esfuerzo de corte mínimo τ_0 mediante Casson vs Temperatura.....	74

Gráfica 4.11 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	91
Gráfica 4.12 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado).....	91
Gráfica 4.13 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	92
Gráfica 4.14 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado).....	92
Gráfica 4.15 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	93
Gráfica 4.16 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado).....	93
Gráfica 4.17 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	94
Gráfica 4.18 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado).....	94
Gráfica 4.19 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	95
Gráfica 4.20 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	95

Gráfica 4.21 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	96
Gráfica 4.22 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	96
Gráfica 4.23 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	97
Gráfica 4.24 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	97
Gráfica 4.25 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 muestras para cada intervalo.....	98
Gráfica 4.26 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	98
Gráfica 4.27 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	99
Gráfica 4.28 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	99
Gráfica 4.29 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	100
Gráfica 4.30 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	100

Gráfica 4.31 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	101
Gráfica 4.32 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	101
Gráfica 4.33 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	102
Gráfica 4.34 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	102
Gráfica 4.35 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	103
Gráfica 4.36 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	103
Gráfica 4.37 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	104
Gráfica 4.38 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	104
Gráfica 4.39 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	105
Gráfica 4.40 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	105

Gráfica 4.41 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	106
Gráfica 4.42 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	106
Gráfica 4.43 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	107
Gráfica 4.44 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	107
Gráfica 4.45 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	108
Gráfica 4.46 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	108
Gráfica 4.47 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	109
Gráfica 4.48 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.....	109
Gráfica 4.49 Reograma de referencia “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C.(Wagner et al., 2012).....	110
Gráfica 4.50 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.....	111

Gráfica 4.51 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.....	112
Gráfica 4.52 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 40°C.....	113
Gráfica 4.53 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 50°C.....	114
Gráfica 4.54 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (90 % de Glicerina y 10% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	115
Gráfica 4.55 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	115
Gráfica 4.56 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	116
Gráfica 4.57 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	116
Gráfica 4.58 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	117
Gráfica 4.59 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	117
Gráfica 4.60 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	118

Gráfica 4.61 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	118
Gráfica 4.62 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.	119
Gráfica 4.63 Reograma de Coeficiente de consistencia k mediante Casson vs Temperatura	127
Gráfica 4.64 Reograma de Coeficiente de consistencia k mediante Ley de la potencia vs Temperatura.....	128
Gráfica 4.65 Reograma de Coeficiente de consistencia k mediante Herschel – Bulkley vs Temperatura.....	129
Gráfica 4.66 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 20°C).....	130
Gráfica 4.67 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 30°C).....	130
Gráfica 4.68 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 40°C).....	131
Gráfica 4.69 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 50°C).....	131
Gráfica 4.70 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 20°C).....	132
Gráfica 4.71 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 30°C).....	132
Gráfica 4.72 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 40°C).....	133
Gráfica 4.73 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 50°C).....	133
Gráfica 4.74 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 20°C).....	134
Gráfica 4.75 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 30°C).....	134

Gráfica 4.76 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 40°C).....	135
Gráfica 4.77 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 50°C).....	135
Gráfica 4.78 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 20°C).....	136
Gráfica 4.79 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 30°C).....	136
Gráfica 4.80 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 40°C).....	137
Gráfica 4.81 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 50°C).....	137
Gráfica 4.82 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 20°C).....	138
Gráfica 4.83 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 30°C).....	138
Gráfica 4.84 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 40°C).....	139
Gráfica 4.85 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 50°C).....	139
Gráfica 4.86 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 20°C).....	140
Gráfica 4.87 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 30°C).....	140
Gráfica 4.88 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 40°C).....	141
Gráfica 4.89 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 50°C).....	141
Gráfica 4.90 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 20°C).....	142

Gráfica 4.91 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 30°C).....	142
Gráfica 4.92 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 40°C).....	143
Gráfica 4.93 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 50°C).....	143
Gráfica 4.94 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 20°C).....	144
Gráfica 4.95 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 30°C).....	144
Gráfica 4.96 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 40°C).....	145
Gráfica 4.97 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 50°C).....	145
Gráfica 4.98 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 20°C).....	146
Gráfica 4.99 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 30°C).....	146
Gráfica 4.100 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 40°C).....	147
Gráfica 4.101 Reograma de Viscosidad dinámica (mPa-s) vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 50°C).....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tabla de cálculos de concentraciones para las emulsiones.....	40
Tabla 2	Esquema de Base de datos para cada concentración de mezclas	41
Tabla 3	Enumeración para emulsiones en reogramas.....	66
Tabla 4	Errores de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s.....	75
Tabla 5	Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 20°C.....	111
Tabla 6	Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 30°C.....	112
Tabla 7	Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 30°C.....	113
Tabla 8	Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 50°C.....	114
Tabla 9	Resultados esperados.....	120
Tabla 10	Metodología.....	121

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

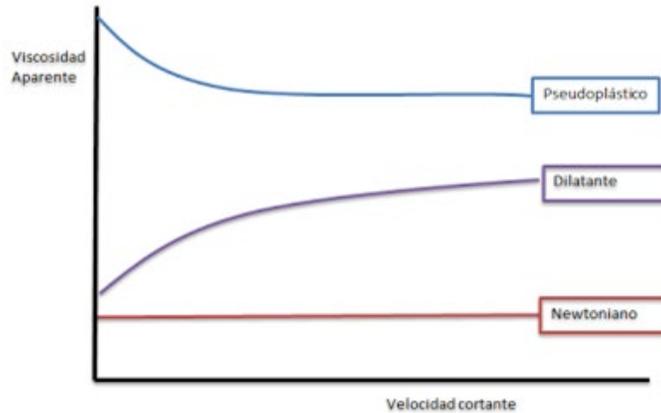
Las medidas reológicas son una herramienta analítica que permite una comprensión del comportamiento de los fluidos, lo cual es dependiente de su organización estructural molecular. Mediante estudios reológicos podemos evaluar el comportamiento que tienen los fluidos en función de diferentes parámetros y variables que afectan su estructura molecular, independiente de que fluido esté sometido en estudio.

Varios factores afectan el comportamiento reológico de los fluidos, entre las principales se encuentra la temperatura, tamaño de las partículas, viscosidad y análisis de esfuerzos.

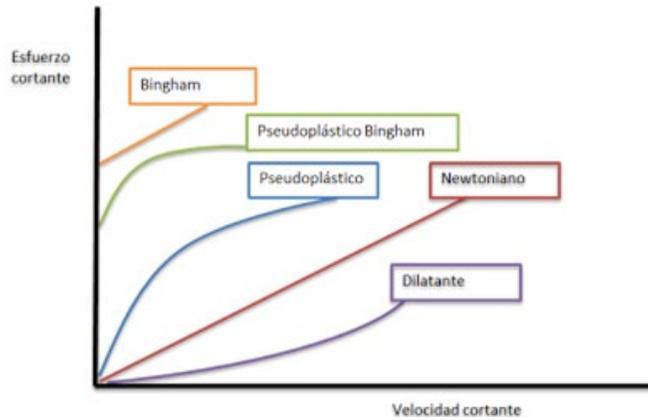
La reología estudia la deformación y flujo de la materia, extendiéndose desde la mecánica de fluidos hasta la elasticidad de Hooke. La deformación ocurre cuando la materia se encuentra en estado sólido y el flujo cuando la materia está en estado líquido. (Barnes, 2000)

Las propiedades reológicas de interés en el caso de sólidos es la elasticidad y en el caso de líquidos es la viscosidad. En tanto, algunos materiales no pueden ser diferenciados en sólidos o líquidos con certeza de modo que la propiedad reológica de interés en este caso es la viscoelasticidad. (Reid, 1959)

Actualmente los estudios reológicos se aplican en Chile en las empresas que procesan fluidos de alimentos a nivel industrial. Las circunstancias de su aplicación son principalmente para entender el comportamiento que puede tener el fluido alimenticio en la red de cañería o Pipping para su transporte (TPI, 2021)(Gomez, 1997), es por ello, que se realizan estudios reológicos de la leche, jugos de fruta y cremas, entre otros, (Ashitey, 2016) evitando así problemas en la cadena de suministro, transporte y principalmente para preservar su composición química, física y nutricional, las cuales son requeridas por diversas normativas de salud y regulación en la calidad de alimentos. Bajo esta misma lógica, es posible simular mecanismos de transporte para fluidos de difícil acceso, que quieran ser controlados de forma industrial para diversos fines específicos.



Gráfica 1.1 Comportamiento reológico de los fluidos mediante relación entre "Viscosidad aparente vs Velocidad de corte" (Darlington, 2021)



Gráfica 1.2: Comportamiento reológico de los fluidos mediante relación de "Esfuerzo cortante vs Velocidad de corte" (Darlington, 2021)

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para entender el comportamiento reológico de un fluido es necesario conocer los parámetros reológicos de coeficiente de consistencia "k" e índice de flujo "n" descritos en los modelos matemáticos para comportamientos reológicos. Estos datos se diferencian para cada caso experimental y teórico en función de su temperatura, concentración, equipo y método reológico.

1.3. SOLUCIÓN PROPUESTA

Se propone realizar estudios experimentales de viscosidad de distintas emulsiones (glicerina y agua destilada) a diferentes temperaturas, mediante el reómetro de lectura digital IKA Rotavisc Lo-Vi para crear datos que representen el comportamiento físico de su viscosidad y comparar con otros estudios y fundamentos de literatura, con esto se busca validar el procedimiento experimental para la viscosidad y representar qué tipo de comportamiento tiene cada mezcla mediante Reogramas que describan el comportamiento reológico de las emulsiones

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Obtener parámetros reológicos que describan el comportamiento de las emulsiones mediante datos de viscosidad en emulsiones obtenidas de manera experimental.

1.4.2. Objetivos específicos

- Determinar el procedimiento de laboratorio para realizar estudio reológico.
- Comparar los datos de viscosidad experimentales con datos y fundamentos de literatura.
- Obtener parámetros reológicos mediante los modelos matemáticos Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson que rigen fluidos No Newtonianos.
- Crear Reogramas mediante datos reológicos que describan el comportamiento del coeficiente de consistencia “k”, índice de flujo “n” y viscosidad aparente en función de las temperaturas.

1.5. RESULTADOS ESPERADOS

Con los datos de laboratorio obtenidos de forma práctica mediante análisis de viscosidad y temperatura, esperamos obtener esfuerzos de corte y la constante de viscosidad mediante viscosímetro giratorio. Además, es posible obtener la relación de estos datos con la temperatura.

Utilizando estos datos esperamos obtener parámetros reológicos que describan el comportamiento de cada una de las emulsiones mediante la utilización modelos matemáticos utilizados en la reología de fluidos No Newtonianos.

1.6. METODOLOGÍA

Nuestro estudio reológico necesita inicialmente la obtención de datos del fluido en estudio, en el que inicialmente se evaluara el comportamiento de la glicerina a diferentes temperaturas y luego se estudiarán diferentes tipos de mezclas de glicerina con agua a diferentes temperaturas.

De este análisis se busca obtener mediante el reómetro ROTAVISC y el termorregulador (ya sea en estado puro o mezcla) la densidad del fluido en estudio y los valores de esfuerzo de corte del husillo en contacto con el fluido a distintas temperaturas.

Con estos valores, se puede calcular de forma teórica los valores de la viscosidad aparente y el índice de consistencia de un fluido en función de la temperatura. (Mexpolímeros, 2014)

La memoria se puede dividir en 3 etapas

1. Entrada: Creación de datos reológicos de 36 muestras, 9 concentraciones a 4 diferentes temperaturas y con un rango de estudio de 0 a 100 RPM de giro de husillo.
2. Proceso: Obtención de parámetros reológicos mediante modelos matemáticos que describen el comportamiento de los fluidos
3. Salida: Ecuaciones que describen el comportamiento de los fluidos.

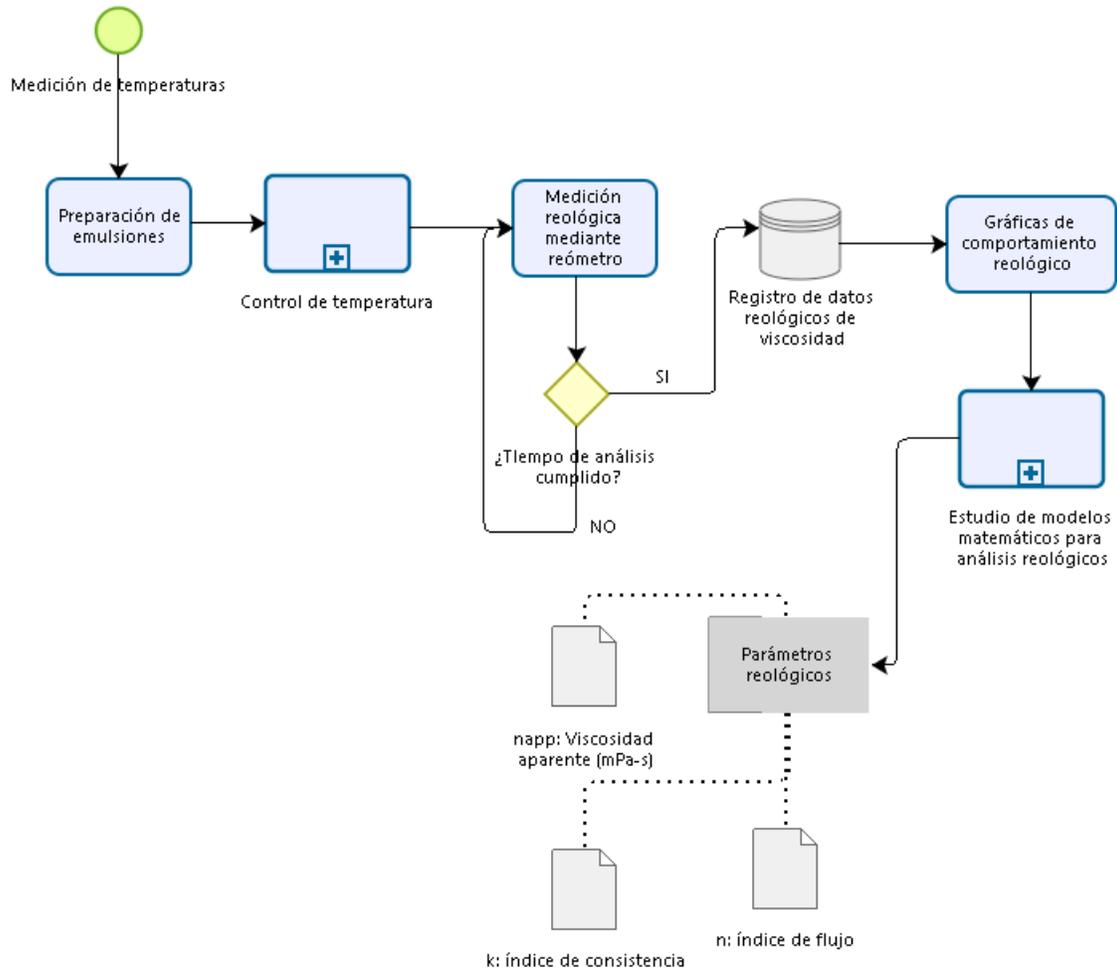


Figura 1.1: Diagrama de flujo “Etapas de entrada y proceso”

Para realizar el análisis reológico de un fluido, se debe realizar en parámetros controlados o estables de temperatura, por lo tanto, el vaso precipitado que contiene el fluido en estudio, debe sumergirse en agua lo que mantendrá la temperatura de superficie del vaso precipitado en rangos muy estables. Esto es importante para el análisis debido a que las ecuaciones requieren

Capítulo 1. Introducción

considerar la temperatura ambiental a la que está sometida el fluido en el medio que interactúa.

Otra consideración importante para la exactitud del análisis, es que el control del sistema en estudio no debe ser manipulado directamente con las manos, todo control debe ser mediante los mecanismos y las herramientas del reómetro evitando así la creación de burbujas de aire en el fluido, lo cual afectaría la obtención de resultados cercanos a los reales del fluido.

Se ingresa en el Reómetro ROTAVISC los siguientes datos. Densidad del fluido en estudio, RPM respectivo para cada estudio y la temperatura requerida para el rango de estudio (20 a 50°C en intervalos de 10°C).

El rango de temperatura va desde la temperatura ambiental 20°C hasta los 50 °C.

Se realiza una emulsión de fluido con un % de agua destilada, con el que se realizarán estudios en relación de % con intervalos incrementales del 10% de agua destilada para cada nivel de mezcla de fluido. Teniendo así un total de 9 muestras de emulsión para análisis.

Para cada estudio de muestra, se ingresa en el Reómetro los siguientes datos, densidad del fluido en estudio, RPM respectivo para cada estudio y la temperatura requerida para el rango de estudio (50°C).

Se realizarán diversos estudios en función de la temperatura y a diferentes velocidades.

Las velocidades de giro para el husillo a utilizar en los estudios serán entre los 10 y 100 RPM.

Cada vez que se realice una muestra, se debe limpiar el vaso precipitado, para evitar problemas de medición, debido a que, al verter el líquido, puede quedar fluido residual adherido de la muestra anterior al vaso precipitado.

Para el vaso precipitado de medición para la glicerina técnica, se utilizará una cuchara de acero inoxidable y toalla de papel seca.

Capítulo 1. Introducción

Se utilizará toalla de tela para el cuidado del espacio de trabajo en caso de verter líquido fuera de la zona de estudio.

De esta manera podemos obtener valores de viscosidad y esfuerzo cortando a distintas temperaturas y a distintos valores de velocidades. Estos resultados permitirán evaluar el comportamiento reológico del fluido para así saber mediante comparación gráfica de datos si su comportamiento es de tipo pseudoplástico, de Bingham u otro.

1.6.1 Rangos del proyecto

- 1) Se entregarán Datos y parámetros Reológicos de emulsiones.
- 2) La memoria se concentrará en una parte de una investigación mayor referente a la reología.
- 3) También, por falta de recursos, se hará una investigación con insumos limitados, por lo que la cantidad de muestras también es limitada y dependiente de esta.
- 4) Se realizarán 9 concentraciones de emulsión de glicerina con agua destilada.
- 5) Debido al tiempo que demora controlar la temperatura, solo se estudiarán 4 rangos de temperatura para cada una de las 9 concentraciones. Estudio total de 36 muestras.
- 6) Se repetirá cada estudio por lo menos 3 veces. De cada estudio reológico se obtendrán como mínimo 2 datos, haciendo un total de 6 datos para cada concentración y temperatura.
- 7) Se realizará registro audiovisual explicativo de la memoria.

1.6.2 Insumos y materiales asociados a las actividades

Creación de emulsiones

- 2 vasos precipitados de 500 mL
- 3 vasos precipitados de 250 mL.

Capítulo 1. Introducción

- 2 litros de agua destilada.
- 2 litros de glicerina técnica

Control de temperatura

- 1 hervidor de agua.
- 1 termómetro.
- Fuente Isotérmica.
- 1 botella.
- 1 manguera.

Creación de datos Reológicos

- 1 Reómetro de husillos giratorio, Marca IKA, modelo LO-VI.
- Husillos estándar SP-1 y SP-2.

Registro audiovisual

- Cámara celular.
- Computadora.
- Programa de edición de imagen Photofiltre y para video Shotcut ambos de licencia abierta.

Creación de datos reológicos mediante viscosímetro giratorio y un termorregulador.

- Recursos utilizados:
- Programa Excel.
- Cuaderno y lapiz para tomar notas.
- Tabla de datos reológicos de las muestras de emulsiones ingresados en Excel.
- Manual de usuario IKA Rotavisc LO-VI.
- Reómetro IKA Kit Rotavisc LO-VI husillos estándar SP-1 y SP-2.
- Fuente de control Isotermica.
- Hervidor de agua.

Capítulo 1. Introducción

- Toalla y paños.
- Botella de 5 litros.
- Manguera.

1.6.3 Planificación mediante Carta Gantt

Se considera como fecha límite de entrega de la memoria acabada y entregada para el día 15 de Julio del 2022 como fecha límite.

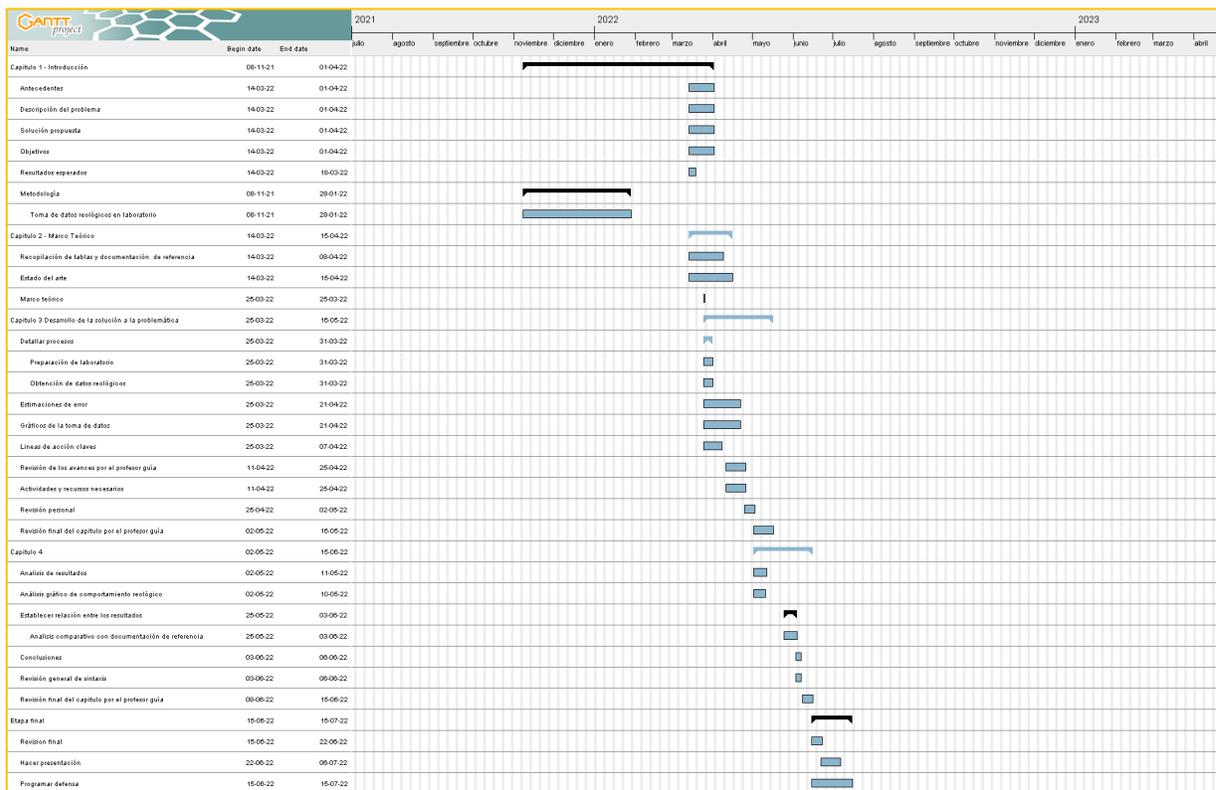


Figura 1.2: Carta Gantt

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. ESTADO DEL ARTE

Los estudios reológicos se realizan en base a datos obtenidos mediante el uso de implementos, herramientas y procedimientos reológicos diversos, lo cuales permiten comprender de forma gráfica, el comportamiento de los fluidos en estudio. Cabe destacar que el porcentaje o nivel de certeza de los datos, como también del comportamiento del fluido fundamentado teóricamente con dichos datos, es dependiente del procedimiento, como también de los implementos, herramientas y condiciones en las que se someta el estudio reológico.

El principal implemento para un estudio reológico, es el Reómetro, el cual existe en varios formatos y diseños, a su vez cada diseño o formato tiene procedimientos de medición y usos que son propios de este.

Existen 2 tipos de Reómetros giratorios, Reómetro de husillo rotativo, y Reómetro de cilindros concéntricos. La diferencia entre ellos es que el Reómetro de cilindros concéntricos, realiza la evaluación reológica sin cambios en el diseño del Reómetro, permitiendo así establecer sus las dimensiones de sus componentes como constantes geométricas, en cambio el Reómetro de Huso, o Splinde rotativo, puede cambiar los tipos de Husillos o Splinde. (PUC-Rio, 2015)

Los fluidos viscosos se dividen en fluidos Newtonianos y No Newtonianos. Los fluidos Newtonianos son aquellos que la relación entre su esfuerzo de corte vs velocidad de corte no varía con respecto al tiempo, teniendo un comportamiento que puede ser determinado constante en función de su pendiente gráfica. (Barnes, 2000) En cambio, los fluidos No Newtonianos la relación entre su esfuerzo de corte vs la velocidad de corte varían con el paso del tiempo, entregando de esta manera diferentes tipos de curvas de comportamiento reológico.

Los fluidos No Newtonianos se pueden segmentar también en la relación entre la Viscosidad aparente vs Velocidad de corte, entre los que encontramos 2 tipos, Fluido No Newtoniano Pseudoplástico y fluido No Newtoniano Dilatante.

(Sánchez, 2016) Considerando ambas relaciones (Viscosidad aparente vs Velocidad de Corte y Esfuerzo de Corte vs Velocidad de Corte) podemos categorizar el comportamiento reológico de un fluido como un fluido de Bingham, Pseudoplástico de Bingham, Pseudoplástico y Dilatante.

Para este estudio la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Talca cuenta con un Reómetro de husillo giratorio o rotativo de marca IKA modelo ROTAVISC LO-VI. Dicho reómetro cuenta con un set de husillos modelo SP-1, el cual permite obtener valores de viscosidad de un fluido en estudio en función de su RPM giratorio de husillo, como también graficar dichos valores en función de la temperatura y el porcentaje de fuerza de torque aplicado en el husillo. Sin embargo, este set de Husillos no entrega valores de análisis de Esfuerzo de Corte y Velocidad de Corte que tiene el husillo en contacto con el líquido en estudio, por lo que para estos casos se deben obtener mediante la relación que hay entre las revoluciones en $\frac{rad}{seg}$ en función del recorrido que tiene la sección de área del husillo durante el transcurso de cada estudio, de esta manera obtendremos valores de velocidad de corte la cual permite obtener valores para el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte.

2.1.1. Viscosidad

La viscosidad se refiere a la resistencia que tienen los líquidos mediante su fluidez y deformación, mientras más resistencia posee un líquido para fluir y deformarse, más viscoso es.

Por lo tanto, a mayor viscosidad, mayor resistencia opondrá el líquido a la deformación y flujo.

(7Graus, 2017; Drubey, 2008; Roldán, 2009)

La viscosidad es la constante de proporcionalidad que aparece en la ley de Newton de la viscosidad, relacionando el esfuerzo cortante (o densidad de flujo de momentum) con el gradiente de velocidad (rapidez de deformación).

$$\tau_{xy} = -\mu * \frac{\partial v_y}{\partial x}$$

Ecuación 1; viscosidad

Por lo tanto, la ecuación constitutiva para el fluido newtoniano está expresada por,

$$\tau = \mu * \dot{\gamma}$$

Ecuación 2; Viscosidad

(Pérez-Trejo et al., 2010)

Según (ISO, 2001) Los fluidos que se comportan de acuerdo de esta ley se denominan “fluidos newtonianos”, e incluyen a la mayoría de los fluidos simples. La viscosidad es una propiedad del fluido que depende de la temperatura y, en algunos casos, también depende de la presión.

Otra forma de definir la viscosidad es como la relación entre el esfuerzo de corte (τ) y la tasa de deformación ($\dot{\gamma}$) adoptada por el fluido; tal como se muestra en la ecuación.

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Ecuación 3; Viscosidad

Donde:

μ : Viscosidad (Pa.s) o (kg/m.s) en el sistema internacional de unidades.

τ : Esfuerzo de corte (Pa)

$\dot{\gamma}$: Velocidad de deformación (1/s).

(Guanoluisa, 2013)

2.1.2. Viscosidad dinámica

Según (Delugo, 2021) la viscosidad dinámica es la propiedad de los fluidos que caracteriza la resistencia a fluir, es decir el equivalente al rozamiento entre sólidos y se debe principalmente a las fuerzas de adhesión y cohesión existente entre las moléculas que los componen y con las del contenedor.

(Delugo, 2021)

2.1.3. Viscosidad aparente

Por lo expresado según (Drubey, 2008) para los fluidos no Newtonianos se utiliza el concepto de viscosidad aparente μ_a . Relacionada con la ley de la potencia de Oswald de Weale. Esta tiene una relación con el gradiente de velocidad para las propiedades reológicas de emulsión al experimentarse las variaciones de temperatura.

$$\mu_a = K(\dot{\gamma})^{n-1}$$

Ecuación 4; Viscosidad aparente

μ_a : Viscosidad aparente (mPa)

k : Coeficiente o índice de consistencia de flujo (mPa.sn)

$\dot{\gamma}$: Velocidad de deformación (1/s)

n : Índice de comportamiento al flujo o índice de flujo.

2.1.4. Viscosidad cinemática

La viscosidad cinemática es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido (Finnemore, 1999)

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

Ecuación 5; Viscosidad cinemática

Donde:

ν : Es la viscosidad cinética en centiStokes (cS).

μ : Viscosidad dinámica en Centipoise (cP)

ρ : Densidad (g/cm³) del fluido.

Según lo expresado por (Guanoluisa, 2013; Roldán, 2009) si se representa la curva de fluidez (esfuerzo cortante frente a velocidad de deformación) se define también como la pendiente en cada punto de dicha curva.

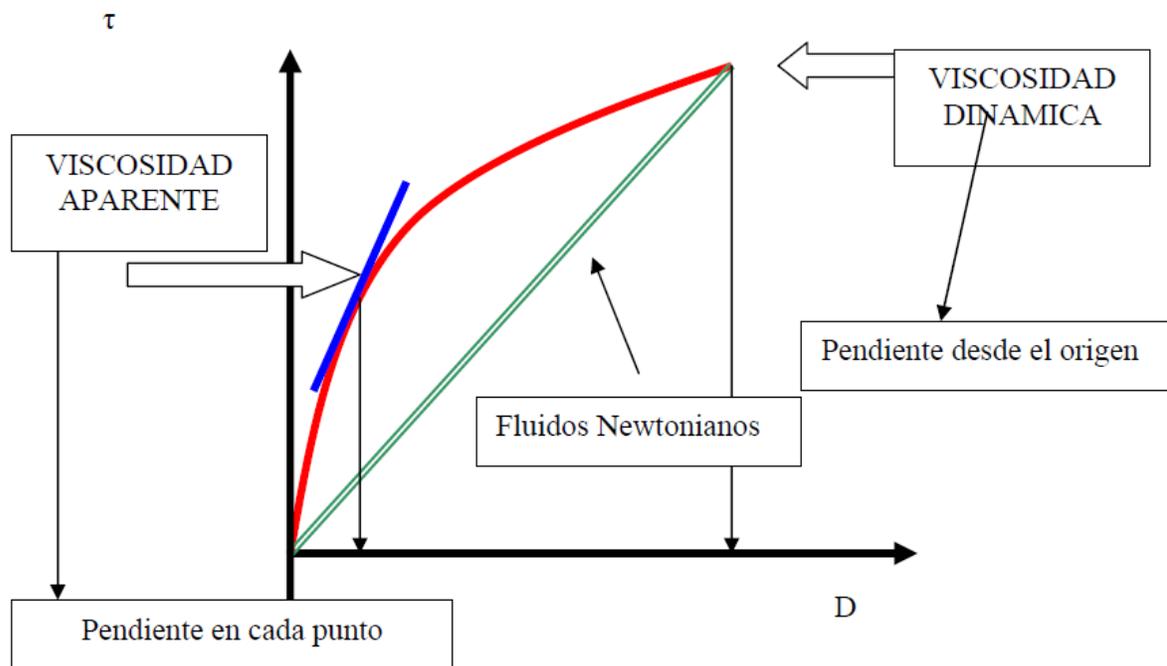


Ilustración 2-1 Curva de fluidez para representar la viscosidad dinámica y aparente (Roldán, 2009)

3. Unidades

Referenciandonos por (Guanoluisa, 2013) “Las unidades de viscosidad dinámica más utilizadas son los Pascales y miliPascales por segundo (Pa·s) y (mPa·s). Se debe tener en cuenta que 1000 mPa·s = 1 Pa·s. Además, el sistema cegesimal aún se sigue usando, siendo la unidad de medida el centiPoise (cP). La conversión de unidades entre los dos sistemas es: 1 cP = 1 mPa·s y 1 Poise = 1 gr/cm·s.”

GASES (μP)		LÍQUIDOS (cP)	
H ₂	88	N ₂ (-196°C)	0.158
He	196	Acetona	0.324
O ₂	175	H ₂ O (0°C)	1.792
N ₂	203	H ₂ O (20°C)	1.005
Aire	181	H ₂ O (100°C)	0.284
CO ₂	146	Hg	1.5
NH ₃	103	Sangre (37°C)	3-4
H ₂ O (100°C)	125	H ₂ SO ₄	26.7
		Glicerina	1200
		Jarabe de maíz	1400
		Miel	2000-10000

(Cruz Fernando, 2015)

Unidades de la viscosidad

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} = [ML^{-1}T^{-1}] = \frac{\frac{N}{m^2}}{\frac{m}{sm}} = \frac{Ns}{m^2} = \frac{kg \frac{m}{s^2} s}{m^2} = \frac{kg}{ms} = Pa \cdot s = cP$$

Ecuación 6; Unidades de viscosidad

(Guanoluisa, 2013)

Viscosidad

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\frac{kg}{ms}}{\frac{kg}{m^3}} = \frac{m^2}{s}$$

Ecuación 7; Viscosidad

$1m^2/s = 10^4$ stoke (St) = 10^6 centistokes (cSt)

(Guanoluisa, 2013)

Velocidad de corte

$$\dot{\gamma} = \gamma = \frac{du}{dy}: \text{Velocidad de deformación del fluido} \left(\frac{1}{s}\right) = \frac{\text{Velocidad husillo} \left[\frac{mt}{s}\right]}{\text{altura}[mt]}$$

Ecuación 8; Velocidad de corte

Donde;

$$\text{Velocidad husillo} \left[\frac{mt}{s}\right] = \frac{\text{Recorrido total husillo}[mt]}{\text{Tiempo de análisis [seg]}}$$

Ecuación 9; Velocidad de husillo

$$\text{Recorrido total husillo [mt]} = \text{Perímetro [mt]} * \text{Revoluciones por minuto [RPM]} * \text{tiempo estudio [minutos]}$$

Ecuación 10; Recorrido total husillo

$$\text{Perímetro} = \frac{2 * \pi * \text{Diametro sección circunferencia [mt]}}{2}$$

Ecuación 11; Perímetro

Esfuerzo de corte

$$\tau = \mu\gamma = \mu[\text{mPa}] \gamma \left[\frac{1}{s}\right] * 1000 = \tau [\text{Pa}]$$

Ecuación 12; Esfuerzo de corte

3.1.1. Clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico

La reología permite clasificar los fluidos según su tipo de comportamiento, el cual va en función de sus propiedades reológicas. De manera general, la primera clasificación viene según si su comportamiento reológico siga la ley de Newton para ser Newtoniano o no la siga para ser No Newtoniano.

La ecuación de la Ley de Newton de viscosidad de un fluido es

$$\tau = -\mu * \frac{du}{dy}$$

Ecuación 13; Ley de la viscosidad de Newton

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

μ : Viscosidad dinámica del fluido (Pa-segundo)

du/dy : Velocidad de deformación del fluido $\left[\frac{1}{s}\right] = \gamma$

(Guanoluisa, 2013)

Así, según (Burgos,2018 ; Guanoluisa, 2013) la clasificación de los fluidos según su comportamiento reológico puede establecerse de la siguiente forma:

Fluidos Newtonianos.

Fluidos no-Newtonianos.

- Independientes del tiempo.
 - Plásticos de Bingham.
 - Pseudoplásticos.
 - Dilatantes.
- Dependientes del tiempo.
 - Fluidos tixotrópicos.
 - Fluidos reopéticos.

Fluidos viscoelásticos.

3.1.2. Reómetros rotacionales

Su Sistema de análisis somete en estudio el fluido cuando es sometido a esfuerzos de cizalla los cuales en el caso de una tubería dependen del contacto con las paredes de tubería, sin embargo, para el caso de un Sistema rotacional, utiliza Husillos o Splinde como herramienta para el análisis, en el cual la viscosidad depende del esfuerzo de corte generado en la capa límite entre el husillo que se encuentra en rotación y el líquido con el que está en contacto.

3.1.3. Reómetros de cilindros concéntricos

Es un tipo de reómetro rotacional el cual utiliza como husillo o splinde un cilindro con geometrías específicas, es decir, la geometría del husillo siempre es cilíndrica. Esto permite establecer ecuaciones para el estudio reológico en función de dimensiones las cuales se establecen como constantes geométricas.

3.1.4. Reómetros de husillos rotativos

Los reómetros de husillos rotativos, son aquellos en los que su principal característica es la capacidad de cambio de husillo o splinde para el estudio reológico, en donde cada husillo tiene capacidades de estudio propias y que dependen de la velocidad de rotación que se le entregue al husillo como también a la exactitud de valorización de datos que se quiere obtener. El adaptador sujetador de husillos tiene la capacidad de sostener diferentes tipos de husillos con el fin de que el reómetro tenga husillos intercambiables. Dicho adaptador se encuentra conectado con un resorte giratorio que genera una resistencia a la rotación, dicha capacidad de resistencia a la tensión se valoriza porcentualmente del 0% al 100% siendo el 100% la capacidad máxima que tiene el resorte de soportar la tensión para un análisis, es decir, que si el husillo genera demasiada tensión en el resorte, el reómetro dejará de entregar valores reológicos y se aconseja ya sea cambiar el husillo o bajar la velocidad de rotación del husillo para que opere a revoluciones más bajas que permitan reducir la tensión del resorte que viene a causa de la reducción de la fricción del husillo con el líquido en contacto.

3.1.5. Husillos o Splinde

Las dimensiones de cada husillo son diferentes y esa diferencia geométrica, es la que genera distintas áreas de contacto con un fluido en estudio, por lo tanto, su área en el cual se desarrolla la capa límite es dependiente de la geometría, las cuales varían principalmente en 3, husillos cilíndricos, de paleta y cónicos.

/// Spindle dimensions (mm)

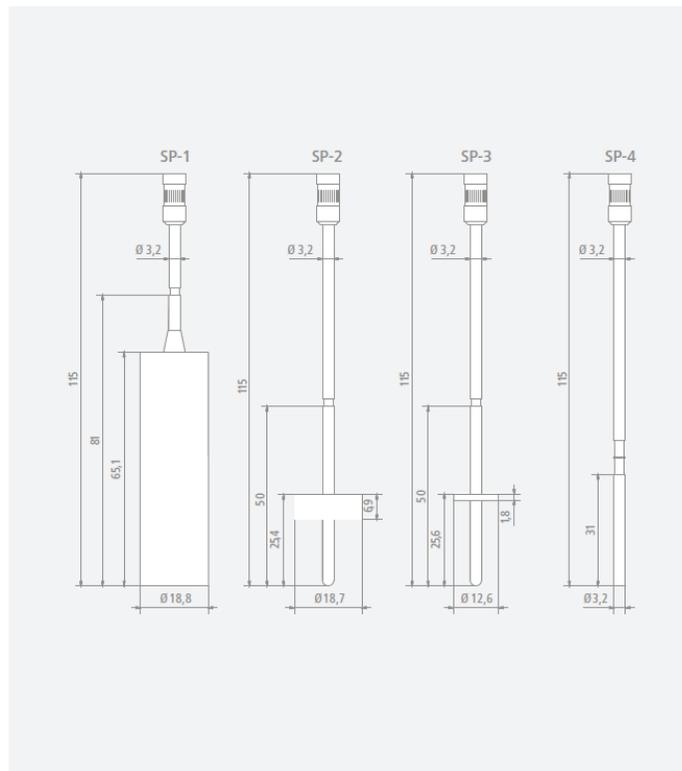


Figura 2.1: Tipos de Husillo del equipo SP-1 (Technical Information for Keithley, n.d.)

3.1.6. Glicerina

Tomando como referencia a (Pérez, 2010) desde un punto de vista reológico, la glicerina en estado puro. es un fluido de comportamiento Newtoniano, es un fluido de carácter químico no orgánico que tiene fundamentos de estudios reológicos amplios.

3.1.7. Emulsiones

Nos referimos a emulsiones a mezclas de fluidos de carácter químico no orgánico que actúen como soluto con otros fluidos que actúen como solvente como lo es el agua.

3.1.8. Estudios reológicos

El análisis de estudios reológicos contempla analizar valores de viscosidad, los cuales pueden ser obtenidos mediante diferentes métodos, ya sea de forma experimental como teórica.

En el caso de obtener la viscosidad de un fluido mediante el uso de reómetros de husillos giratorio, estos valores pueden ser relacionados con la velocidad de giro del husillo y con el esfuerzo de corte que representa las fuerzas que interactúan con el fluido en la zona de contacto con el husillo.

Para obtener la velocidad de corte, esta se logra relacionando la velocidad rotativa RPM convertida a $\frac{rad}{seg}$ en función con el recorrido total que tiene el husillo al girar lo largo de cada muestra en estudio, teniendo así velocidades de corte para cada muestra, velocidad de giro rotativo y estudio.

Por lo expresado según (Burgos,2018) Al graficar el esfuerzo de corte en función de la velocidad de corte, es posible trazar el comportamiento del fluido de forma gráfica y evaluar mediante los modelos matemáticos (Martinez,2015) que describen la reología (Ley de la Potencia, Herschel – Bulkley, Casson, Bingham, entre otros) para obtener parámetros reológicos que describen el comportamiento del fluido (Coeficiente de consistencia “k” e índice de flujo “n”).

Según (Drubey, 2008) mediante el índice de flujo “n” se puede definir si un fluido tiene un comportamiento reológico de carácter Newtoniano o No Newtoniano, como también clasificar que tipo de fluido es. Mediante el coeficiente de consistencia “k” podemos entender como se comporta el fluido en movimiento.

3.1.9. Fluidos Newtonianos

Los fluidos Newtonianos son aquellos en que la pendiente de la curva entre el esfuerzo de corte y la velocidad de deformación que corresponde a la viscosidad, se mantiene constante a temperatura constante, es por ello que en la figura 1.1 (Burgos, 2018) (a) se presenta como una recta y en b) permanece la viscosidad constante. Para el caso de los fluidos No Newtonianos dicha relación no presenta una recta debido a que su relación no es constante, por lo que cambia con respecto al tiempo. los fluidos Newtonianos tienen características reológicas estables que permiten ser estudiados por la Ley de viscosidad de Newton.

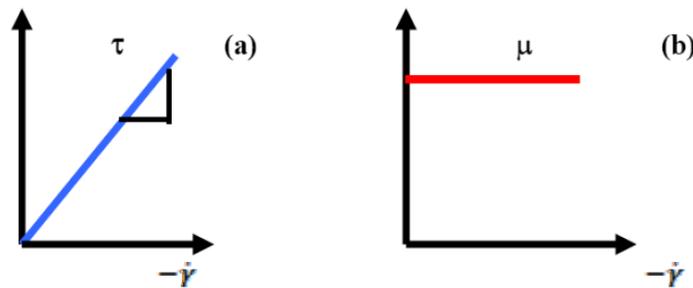


Figura 2.2: Curvas de viscosidad para un fluido Newtoniano a) (τ vs $-\dot{\gamma}$) b) (μ vs $-\dot{\gamma}$) (Burgos, 2018)

3.1.10. Fluidos No Newtonianos

Según (Perez, 2010) los fluidos No Newtonianos son aquellos que la relación del esfuerzo de corte en función con la velocidad de corte cambia con respecto al tiempo, por lo tanto, no es posible graficar mediante una diagonal con cierta pendiente que se mantenga estable. En la gráfica 1.1 es posible apreciar que la relación entre la viscosidad y la velocidad de corte de un estudio reológico tiende a entregar valores que varían generando curvas de comportamiento para el caso de fluidos No Newtonianos. En la gráfica 1.2 (Burgos, 2018) es posible apreciar

la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte mantiene una diagonal con pendiente constante, sin embargo, no comienza del 0, por lo tanto, no es posible predecir su comportamiento mediante la ley de viscosidad de Newton. Lo mismo ocurre con los fluidos que son representados con curvas de comportamientos, es decir, los fluidos No Newtonianos tienen características reológicas que no son estables, por lo que no es posible que sean estudiados mediante la Ley de viscosidad de Newton, por lo que se establecen modelos matemáticos que describan cada curva. Entendiendo el tipo de comportamiento que tiene cada fluido, es posible vincular modelos matemáticos específicos para las características reológicas No Newtonianas del fluido.

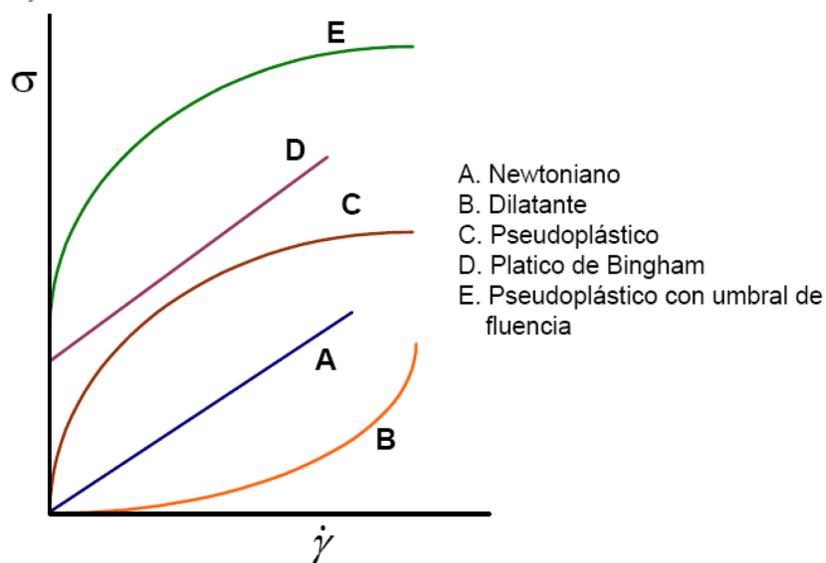


Figura 2.3: Curvas de viscosidad para fluidos No Newtonianos (Burgos, 2018)

3.1.11. Fluido independiente del tiempo de carácter No Newtonianos Dilatante

Según (Sánchez, 2016) son aquellos en que la viscosidad del fluido aumenta a medida que la tasa de proporcionalidad de corte aumente, la velocidad de corte corresponde a la capacidad de

movimiento que tienen las moléculas del fluido cuando son sometidas a una carga, tensión o esfuerzos en un periodo de tiempo determinado.

3.1.12. Fluido independiente del tiempo de carácter No Newtonianos Bingham

Según (Sánchez, 2016) son aquellos que necesitan estar en contacto con una carga o esfuerzos para comenzar el movimiento de las partículas del fluido, eso quiere decir que, si no se le someten cargas al fluido, se mantiene parcialmente estático, como es el caso del Ketchup o la mayonesa. A pesar de estar característica, la relación de proporcionalidad entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte se grafica como una diagonal con una pendiente.

3.1.13. Fluido independiente del tiempo de carácter No Newtonianos Pseudoplástico

Según (Sánchez, 2016) La principal característica del fluido es que disminuye su viscosidad a medida que la tasa de proporcionalidad de corte aumente, esta última se refiere a la proporción que hay entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

3.1.14. Fluido dependiente del tiempo de carácter No Newtonianos Toxitrópicos

Según (Sánchez, 2016) son fluidos en los que su viscosidad va disminuyendo a medida que es sometida a esfuerzos o cargas y que actúa en función de un tiempo determinado, esto quiere decir, que a medida que pase el tiempo su viscosidad va variando. Además, luego de un tiempo determinado para cada fluido, tienden a recuperar paulatinamente su viscosidad.

3.1.15. Fluido dependiente del tiempo de carácter No Newtonianos Reopéticos

Según (Sánchez, 2016) Son fluidos que su viscosidad va aumentando a medida que aumenta su velocidad de corte en el estudio reológico, al aumentar la velocidad de corte, genera que las

partículas en estudio tiendan a moverse más aumentando así la tasa de deformación del fluido en un tiempo determinado. Después del reposo, el fluido tiende a recuperar paulatinamente su viscosidad inicial, previa al estudio reológico.

3.1.16. Fluido dependiente del tiempo de carácter No Newtonianos Viscoelástico

Según (Sánchez, 2016) son fluidos que tienen una conformación molecular ordenada la cual les permite tener propiedades elásticas. Dichas propiedades elásticas se pierden luego de ser sometidas a cargas cuando el orden de la conformación molecular se rompe debido a los esfuerzos aplicados en la macroestructura molecular.

3.1.17. Parámetros reológicos en fluidos no Newtonianos.

Punto de Cedencia (τ_y)

Según (Guanoluisa, 2013) representa el valor del esfuerzo de corte para una velocidad de deformación igual a cero. Su valor aumenta con el contenido de sólidos y disminuye con el aumento de contenido de agua o dispersantes.

Índice de flujo (n)

Indica el grado de desviación del comportamiento reológico del fluido con respecto a los fluidos newtonianos, cuando es menor que la unidad 1, el fluido es newtoniano, y cuando es menor que 0,7 es pseudoplástico, cuando es mayor a 1 es dilatante. Es decir, mientras más se aleje el valor de n de 1 más pronunciadas serán las características no newtonianas del fluido.

Índice de consistencia (k)

Según (Guanoluisa,2013; 9dok,2021) indica como se caracteriza los compuestos de la emulsión y la consistencia del fluido, es decir, es una medida indirecta de la viscosidad que dependen de n. A medida que k aumenta el fluido se hace más espeso o viscoso.

3.2. MODELOS MATEMÁTICOS PARA FLUIDOS

3.2.1. Ley de la potencia

Es un modelo que describe el esfuerzo de corte se puede obtener del coeficiente de consistencia en función de la velocidad de corte y el coeficiente de flujo, de esta manera relaciona el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, mediante la siguiente ecuación:

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

Ecuación 14; Modelo matemático Ley de la potencia

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

k : Coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa.sn)

$\dot{\gamma}$: Velocidad de deformación (1/s)

n : Índice de comportamiento al flujo o índice de flujo.

(Burgos, 2018; Guanoluisa, 2013; Sánchez, 2002)

3.2.2. Modelo de Bingham

Son fluidos que, para deformarse, necesitan un esfuerzo de corte mínimo,

$$\text{Si } \tau > \tau_0 : \tau = \tau_0 + \eta_{pl}$$

Ecuación 15; Modelo matemático Bingham

$$\text{Si } \tau \leq \tau_0 : \dot{\gamma} = 0$$

Ecuación 16; Modelo matemático Bingham reducido

(Burgos Robles & Rivera Shyan, 2018; SÁNCHEZ, 2016)

3.2.3. El modelo de Herschel Bulkley

Es un modelo que aplica un esfuerzo de corte inicial que representa el esfuerzo mínimo de deformación en un fluido. Se utiliza para obtener valores de esfuerzo mínimo de deformación o para evaluar valores de este cuando el esfuerzo de corte inicial es cuando el fluido se encuentra detenido.

$$\tau = \tau_0 + K_H (\dot{\gamma})^n = 0$$

Ecuación 17; Modelo matemático de Herschel-Bulkley

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

k : Coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa.sⁿ)

τ_0 : Umbral de fluencia (Pa)

$\dot{\gamma}$: Velocidad de deformación (1/s)

(Burgos Robles & Rivera Shyan, 2018; Guanoluisa, 2013; Martinez, 2015; PUC-Rio, 2015; Vajravelu et al., 2011)

Según lo expresado en (Mullineux, 2008) Se estima un umbral de fluencia mínimo en condiciones de muy

bajo flujo de estudio para reometría mediante flujo capilar, por lo que para el caso de reometría mediante husillos giratorios el Umbral de fluencia mínimo aplicado fue dependiente de la geometría del husillo cuando este se mantenía quieto, por lo que el τ_0 puede ser representado como el esfuerzo de corte que aplica la geometría en contacto con el fluido en estado estático. Además, por lo descrito en (Bórquez & Rojas, 2019) y en base a (Rehm, 2012) se estipula que según Casson, “existe linealidad en $\sqrt{\tau}$ vs $\sqrt{\dot{\gamma}}$. Si se considera $\dot{\gamma}$ en la superficie del cilindro que gira, se puede relacionar N (proporcional a $\dot{\gamma}$) con A/L (proporcional a τ). De esta manera si se grafica $\sqrt{A/L}$ vs \sqrt{N} de los datos recopilados en experimentación. Esta relación debería resultar una línea recta, donde al extrapolar a $\sqrt{N} = 0$, se obtiene el valor:”

$$\tau_0 = \left(\frac{A}{L}\right)_{N=0} + \frac{1}{2\pi R^2} = \frac{A}{2\pi r^2 L}$$

Ecuación 18; Umbral de fluencia mínimo estimado para Herschel-Bulkley

τ_0 : Umbral de fluencia (*dinas/cm²*) ; donde 1 (*dinas/cm²*) * 0,01 = 1 (*mPa – s*).

A : Área sección husillo sumergida (cm).

r : radio husillo (cm).

L: Altura sección husillo (cm).

3.2.4. El modelo de Casson

La ecuación (H – B) fue modificada por Casson para determinar por extrapolación más exactamente el valor del esfuerzo mínimo de deformación (τ_0) del punto de corte en ordenadas en especial en suspensiones, según lo indicado por Charm (1981):

$$(\tau)^{0,5} = (K_{OC})^{0,5} + K_C (\dot{\gamma})^{0,5} = 0$$

Ecuación 19; Modelo matemático de Casson

Donde:

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

τ_0 : Umbral de fluencia (Pa)

k : Coeficiente o índice de consistencia de flujo (Pa.sn)

γ : Velocidad de deformación (1/s)

(Burgos Robles & Rivera Shyan, 2018; Guanoluisa, 2013; Martinez, 2015; PUC-Rio, 2015; Vajravelu et al., 2011)

El modelo de Mizrahi y Berk:

$$(\tau)^{0,5} = K_{OM} + K_M (\dot{\gamma})^{n_M} = 0$$

Ecuación 20; Modelo matemático de Mizrahi y Berk

(Burgos Robles & Rivera Shyan, 2018)

3.2.5. Efecto de la temperatura para emulsiones

$$\mu_a = C \cdot e^{\beta t}$$

Ecuación 21; Viscosidad aparente en función de la temperatura

Donde;

$$\mu_a = \text{viscosidad}$$

β = coeficiente que depende del tipo de fluido

$$t = \text{temperatura en } ^\circ C$$

(Drubey, 2008)

3.3. OBTENCIÓN DE PARÁMETROS REOLÓGICOS

Para la velocidad de corte, estimamos el recorrido que tendrá el husillo mediante la ecuación 9

$$\text{perímetro husillo (mt)} * \left(\frac{\text{revoluciones}}{\text{minuto}} \right) (\text{cantidad de minutos}) = \text{recorrido (mt)}$$

Para obtener la velocidad de corte se relaciona la velocidad de giro (mt/seg) con la dimensión de la sección que se encuentra realizando el corte con el fluido, que en el caso de un husillo, vendría siendo su altura h.

$$\dot{\gamma} \left(\frac{1}{s} \right) = \text{velocidad de giro} \left(\frac{mt}{seg} \right) * \text{sección de corte } h (mt) = \frac{1}{seg}$$

Ecuación 22; unidades de medida velocidad de deformación

El esfuerzo de corte se obtiene aplicando la ley de Newton relacionando la velocidad de corte del husillo con la viscosidad obtenida que en este caso se encuentra en mPa-s (mPa*segundo).

$$\tau (mPa) = \dot{\gamma} \left(\frac{1}{s} \right) * \text{viscosidad } (mPa - s)$$

Ecuación 23; unidades de medida Esfuerzo de corte

Por lo que para nuestro caso anterior el esfuerzo de corte sería τ (mPa) donde 1 milipascal (mPa) = a 0,001 Pascal (Pa)

Al graficar todos los valores obtenidos para cada toma obtenemos el reograma que relaciona el esfuerzo de corte con la velocidad de corte.

2.3.1 Obtención de parámetros de Ley de la potencia

Aplicando el logaritmo en base 10 de la relación τ (Pa)/ $\dot{\gamma}$ (1/s), podemos obtener los coeficientes de flujo “n” y el coeficiente de consistencia “k”.

Los valores de índice de consistencia (n) a 20°C de una concentración de 40% glicerina y 60% agua destilada se obtiene de la gráfica tomando en cuenta la ecuación de la ley de la potencia aplicada para fluidos pseudoplásticos.

$$\tau = k\gamma^n$$

Ecuación 24; Modelo matemático Ley de potencia aplicado

$$\log \tau_0 = \log k + n \log \gamma_w$$

Ecuación 25; Logaritmo del Modelo matemático Ley de potencia

2.3.2 Obtención de parámetros de Casson

Aplicando la raíz cuadrada de la relación τ (Pa)/ $\dot{\gamma}$ (1/s), podemos obtener los coeficientes de flujo “n”, esfuerzo cortante inicial τ_0 y el coeficiente de consistencia “k”.

Los valores de índice de consistencia (n) a 20°C de una concentración de 40% glicerina y 60% agua destilada se obtiene de la gráfica tomando en cuenta la ecuación de la ley de la potencia aplicada para fluidos pseudoplásticos.

$$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + k\gamma^{0,5}$$

Ecuación 26; Modelo matemático Casson

$$n = 0,5 \text{ (cte)}$$

2.3.3 Obtención de parámetros de Herschel Bulkley

Aplicando el logaritmo en base 10 de la relación τ (Pa)/ $\dot{\gamma}$ (1/s), podemos obtener los coeficientes de flujo “n” y el coeficiente de consistencia “k”. El esfuerzo cortante inicial τ_0 es el esfuerzo cortante que ocurre en el instante 0 del estudio, es decir, cuando se encuentra detenido, por lo tanto, se obtiene mediante las constantes geométricas.

$$\tau - \tau_0 = k\gamma^n$$

Ecuación 27; Modelo matemático Herschel-Bulkley

$$\log(\tau - \tau_0) = \log k + n \log \gamma_w$$

Ecuación 28; Logaritmo del Modelo matemático Herschel-Bulkley

3.4. ERROR ESTADÍSTICO

Error absoluto (EA)

Se realiza calculando la diferencia entre el valor obtenido y el teórico que existe en un número determinado de datos, siendo para este caso “y” el valor real e “ \tilde{y} ” el valor teórico utilizado como referencia.

$$\text{Error absoluto (EA)} = y - \tilde{y}$$

Ecuación 29; Error absoluto (EA)

(Cienciadehoy, 2021; Devore, 2008; García, 2000)

Error medio (EME)

Es el promedio del Error absoluto. Se realiza calculando la diferencia entre el valor obtenido y el teórico que existe en un número determinado de datos, siendo para este caso “y” el valor real, “ \tilde{y} ” el valor teórico utilizado como referencia y “n” la cantidad de datos. De esta manera se obtiene un promedio estadístico del error.

$$\text{Error medio (EME)} = \frac{y - \tilde{y}}{n}$$

Ecuación 30; Error medio (EME)

(cienciadehoy, 2021; Devore, 2008; Luis Benites, 2021)

Error cuadrático (EC)

Se realiza calculando el cuadrado de la diferencia entre el valor obtenido y el teórico que existe en un número determinado de datos, siendo para este caso “y” el valor real e “ \tilde{y} ” el valor teórico utilizado como referencia.

$$\text{Error cuadrático (EC)} = (y - \tilde{y})^2$$

Ecuación 31; Error Cuadrático (EC)

(Cañadas, n.d.; Devore, 2008; ligdigonzalez, n.d.)

Error cuadrático medio (ECM)

Es el promedio del Error cuadrático (EC). Se realiza calculando el valor del cuadrado de la diferencia entre el valor obtenido y el teórico que existe en un número determinado de datos, siendo para este caso “y” el valor real, “ \tilde{y} ” el valor teórico utilizado como referencia y “n” la cantidad de datos. De esta manera se obtiene un promedio estadístico del error.

$$\text{Error cuadrático medio (ECM)} = \frac{(y - \tilde{y})^2}{n}$$

Ecuación 32; Error Cuadrático medio (ECM)

(Cañadas, 2018; Ligdigonzalez, 2022.)

Error estándar (RSME)

Corresponde a la raíz cuadrática del Error cuadrático medio.

$$\text{Error estándar (RSME)} = \sqrt{\frac{(y - \tilde{y})^2}{n}}$$

Ecuación 33; Error Cuadrático

(Ligdigonzalez, 2022; Oracle, 2022.)

Error R ajustado o R^2

También llamado coeficiente de regression, indica la bondad del modelo y se utiliza para describir que % valores pueden ser descritos según el modelo analizado.

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \tilde{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \tilde{Y})^2}$$

Ecuación 34; Error ajustado R^2

(Ligdigonzalez, 2022.)

Error chi cuadrado X^2

$$X^2_{\text{calculado}} = \sum \frac{(f_o - f_e)^2}{f_e}$$

Ecuación 35; Error Chi cuadrado X^2

*f_o : Frecuencia valor observado
 f_e : Frecuencia valor esperado*

(Devore, 2008)

Intervalos de confianza

Mediante el estudio de intervalos de confianza, es posible obtener un error estadístico que depende del porcentaje de nivel de confianza estimado para el estudio. (Devore, 2008) “El ancho del intervalo proporciona información sobre la precisión de una estimación del intervalo. Si el nivel de confianza es alto y el intervalo resultante es bastante angosto, el conocimiento del valor del parámetro es razonablemente preciso.”

Entre las propiedades básicas de los intervalos de confianza es necesario que además de tener la media poblacional, se necesita que la distribución sea normal y que el valor de la desviación estándar σ de la población sea conocido. Además, para cantidades grandes de toma de datos, con una población muestral $n > 30$, se realizan los intervalos de confianza mediante tabla Z y para $n \leq 30$ sin conocer la desviación estándar σ de la población muestral se utiliza la tabla t-student.

La siguiente expresión de un intervalo de confianza de $100(1-\alpha)\%$ para la media μ de una población normal cuando se conoce el valor de σ .

$$\bar{x} \pm Z_{\frac{\alpha}{2}} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 36; Intervalo de confianza Z

(Devore, 2008)

La siguiente expresión de un intervalo de confianza de $100(1-\alpha)\%$ para la media μ de una población normal sin conocer el valor de σ . Cuando el valor muestral n es pequeña.

$$\bar{x} \pm t_{\alpha, n-1} \cdot \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Ecuación 37; Intervalo de confianza t-student

(Devore, 2008)

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

4. DESARROLLO

El desarrollo de nuestro análisis se realiza utilizando muestras de datos reológicos que son obtenidos de forma práctica en el laboratorio y que representan el comportamiento que tiene el fluido bajo parámetros de estudio.

4.1.1. Procedimiento de Laboratorio para realizar estudio reológico

Considerando que la lectura de la viscosidad del reómetro depende de la resistencia que opone el resorte conectado al husillo y que el fluido cambia su comportamiento en función de la concentración de la mezcla en estudio, la temperatura a la cual se somete el fluido en estudio, la velocidad de giro del husillo y también el tipo de husillo, se utilizaron parámetros de estudio que permitieran obtener datos de forma general, debido a que, si aumenta mucho la velocidad de giro, la tensión en el resorte tiende a aumentar y entre más aumente, menos precisa se vuelve la entrega de datos por parte del reómetro.

La resistencia que opone el resorte tiene un rango [%M] que va de 0% a 100% en los que para 0% es cuando el fluido no opone resistencia a la sección de área del husillo en movimiento y 100% a cuando el fluido opone una resistencia superior a la que el resorte puede soportar para entregar una lectura. Entre mayor sea la sección del área del husillo utilizado, más resistencia opondrá el fluido en contacto, lo que irá aumentando a medida que aumente la velocidad de giro.

Entre más acotada sea el área de sección del husillo sumergido en el líquido, menor es la resistencia que opone el líquido en contacto, por lo que es preferible utilizarla en fluidos muy viscosos como la glicerina pura, la miel, mayonesa.

Para nuestro estudio se utilizó el husillo SP-1 debido a que su sección de área amplia, permite realizar estudios de emulsiones tanto en altas concentraciones, permitiendo lecturas de datos en por lo menos 5 rangos de velocidad (rangos de 10 [RPM] entre 10 y 100 [RPM]).

Considerando que el comportamiento reológico del fluido cambia en función de la temperatura, es que se utiliza agua caliente para calentar el vaso precipitado y la mezcla que este contiene. Sin embargo, en el laboratorio, solo contamos con un dispositivo de control de

temperaturas llamada fuente isotérmica, la cual es óptima para controlar y mantener temperaturas de control estables, sin embargo, no es ideal para calentar agua, por lo que el agua que se le ingresa a la fuente isotérmica debe ser calentada antes.

Para calentar el agua a utilizar en la fuente isotérmica, se utiliza un hervidor eléctrico.

Considerando como base para cada mezcla 0,45 L de glicerina, podemos ir aumentando gradualmente la cantidad de agua destilada cumpliendo la siguiente relación de proporción (mL).

Tabla 1 Tabla de cálculos de concentraciones para las emulsiones

Concentración	Glicerina (L)	% agua	Agua (mL)	Total (L)
100%	0,45	0	0	0,45
90%	0,45	10	0,05	0,5
80%	0,45	20	0,1125	0,5625
70%	0,45	30	0,19285	0,64285
60%	0,45	40	0,3	0,75
50%	0,45	50	0,45	0,9
40%	0,45	60	0,675	1,125
30%	0,45	70	1,050	1,5
20%	0,45	80	1,8	2,25
10%	0,066	90	0,6	0,666

Teniendo las mezclas y aplicando las consideraciones antes señaladas, procedemos a realizar nuestro estudio reológico con un reómetro Rotavisc – Lo Vi y un husillo con un rango de velocidad de giro amplio como es el SP-2, permitiendo así obtener estudios a velocidades de 10 a 100 RPM con una tensión del resorte no superior al 100% para cada estudio, debido a que llegando muy cerca del 100% el reómetro deja de entregar datos de viscosidad.

Las velocidades en estudio van aumentando en 10 RPM para cada análisis y muestra, es decir cada muestra tiene 10 evaluaciones con distinto RPM. Además, este conjunto de estudios va también en función de 4 temperaturas para análisis (20°C, 30°C, 40°C, 50°C) se consideró la temperatura mínima de estudio, 20°C ya que esa es la temperatura ambiente habitual en el laboratorio y se consideró la temperatura máxima de estudio 50°C ya que esa es la temperatura

máxima que puede ser calentada la glicerina con una concentración del 100% utilizando solo agua calentada por el hervidor y dispuesta en la fuente isotérmica. Además, cada una de estas muestras debe ser repetida por lo menos 3 veces para obtener un espectro de datos de viscosidad considerable en función de los RPM de giro de husillo y las 4 temperaturas aplicadas en el estudio. Esto debe ser realizado para cada concentración de mezcla, es decir, tenemos 10 concentraciones de mezclas, las cuales se analizan a 10 velocidades de giro de husillo y que son estudiadas en función de 4 temperaturas, dando un total de 400 tipos de análisis los cuales deben ser estudiados por lo menos 3 veces para mejorar la precisión del estudio.

Tabla 2 Esquema de Base de datos para cada concentración de mezclas

	Temperaturas											
RPM	20°C			30°C			40°C			50°C		
10												
20												
30												
40												
50												
60												
70												
80												
90												
100												

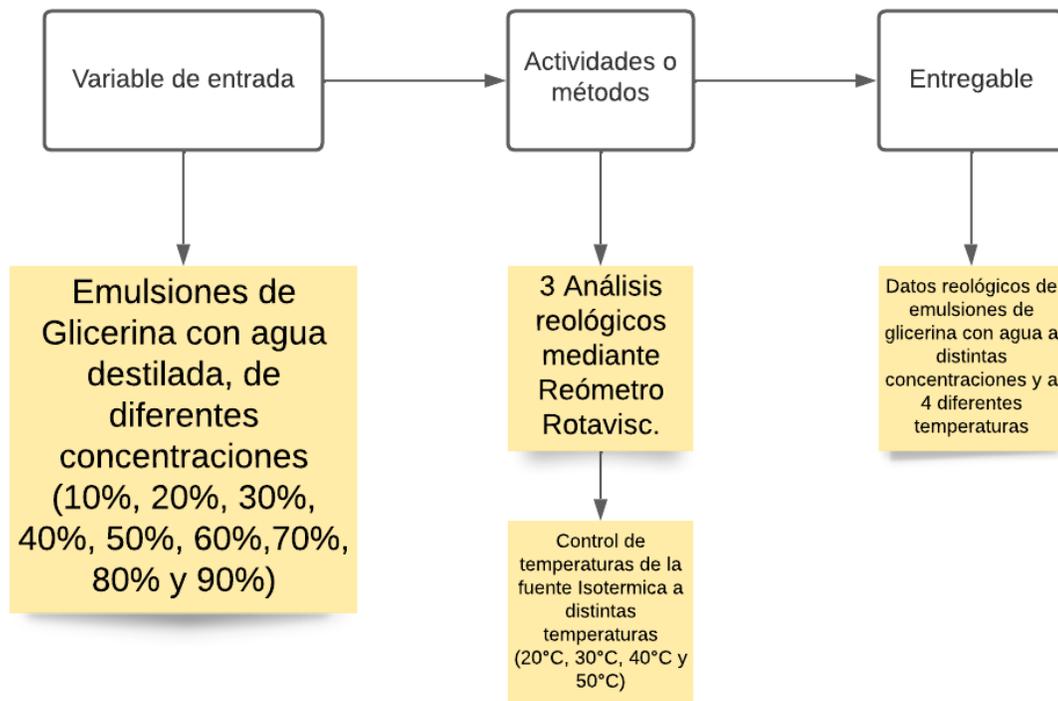


Figura 1.1: Diagrama de flujo "Creación de datos reológicos mediante viscosímetro giratorio y un termorregulador"

Describir procedimiento de laboratorio para realizar estudio reológico.

- Recursos utilizados:
- Programa Excel
- Cuaderno y lapiz para tomar notas
- Tabla de datos reológicos de las muestras de emulsiones ingresados en Excel.
- Cámara del celular
- Manual de usuario IKA Rotavisc LO-VI
- Reómetro IKA Kit Rotavisc LO-VI husillos estándar SP-1 y SP-2.
- Fuente de control Isotermica.
- Hervidor de agua.
- Toalla y paños
- Botellón y manguera

Crear Reogramas mediante datos reológicos.

- Recursos utilizados:
- Programa Excel
- Cuaderno y lapiz para tomar notas
- Tabla de datos reológicos de las muestras de emulsiones ingresados en Excel.

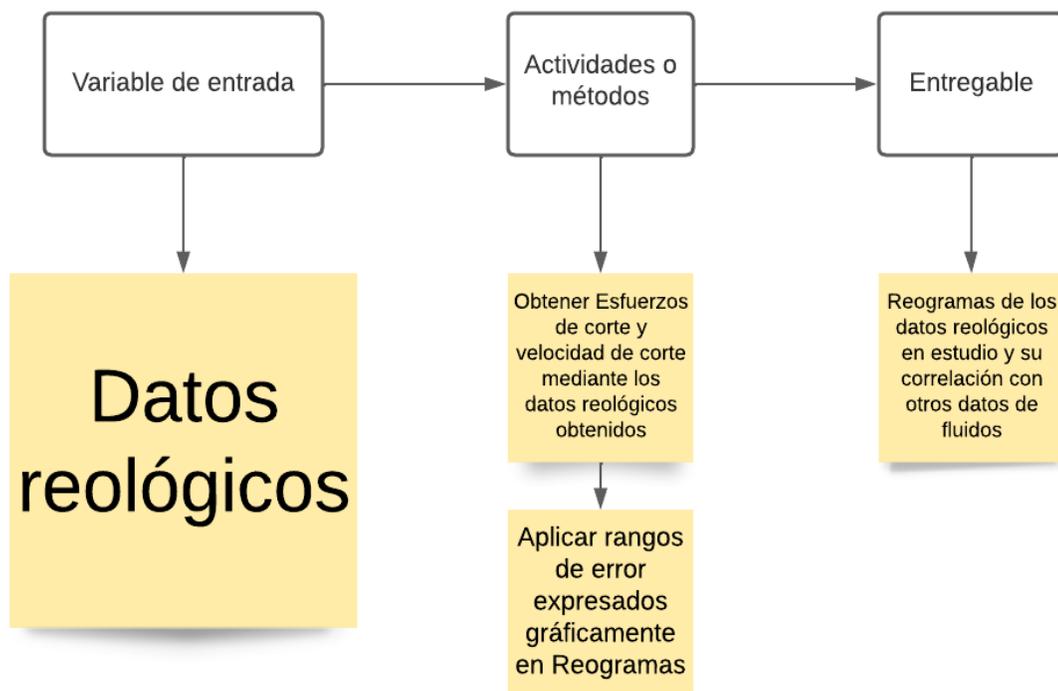


Figura 1.2: Diagrama de flujo "Creación de Reogramas mediante datos reológicos"

Evaluar los datos mediante los modelos matemáticos Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson que rigen fluidos No Newtonianos a diferentes temperaturas y velocidad de giro RPM del reómetro ROTAVISC LO VI.

- Recursos utilizados:
- Programa Excel
- Cuaderno y lapiz para tomar notas

- Tabla de datos reológicos de las muestras de emulsiones ingresados en Excel.

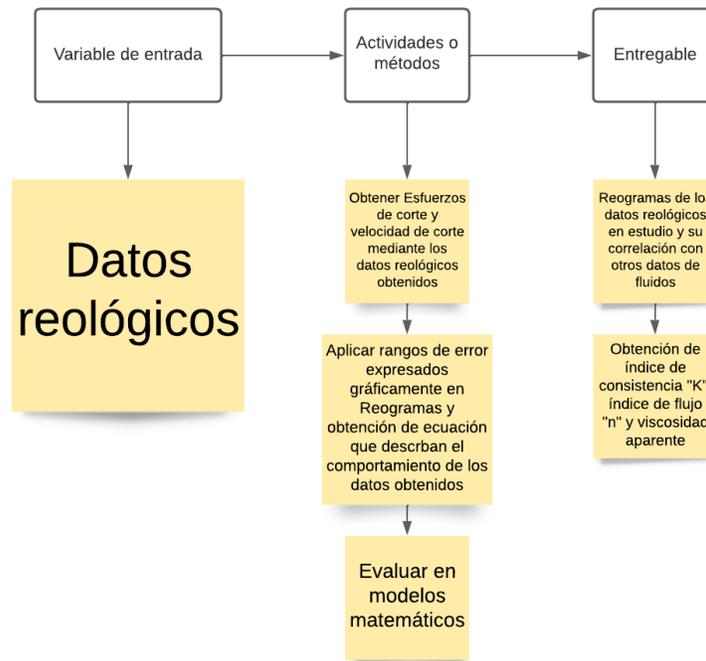


Figura 1.3: Diagrama de flujo “Evaluación de los datos mediante los modelos matemáticos Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson que rigen fluidos No Newtonianos a diferentes temperaturas y velocidad de giro RPM del reómetro ROTAVISC LO VI”

Estudiar modelos matemáticos de Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson para el estudio reológico que rigen fluidos No Newtonianos.

- Recursos utilizados:
- Programa Excel
- Cuaderno y lápiz para tomar notas
- Tabla de datos reológicos de las muestras de emulsiones ingresados en Excel.

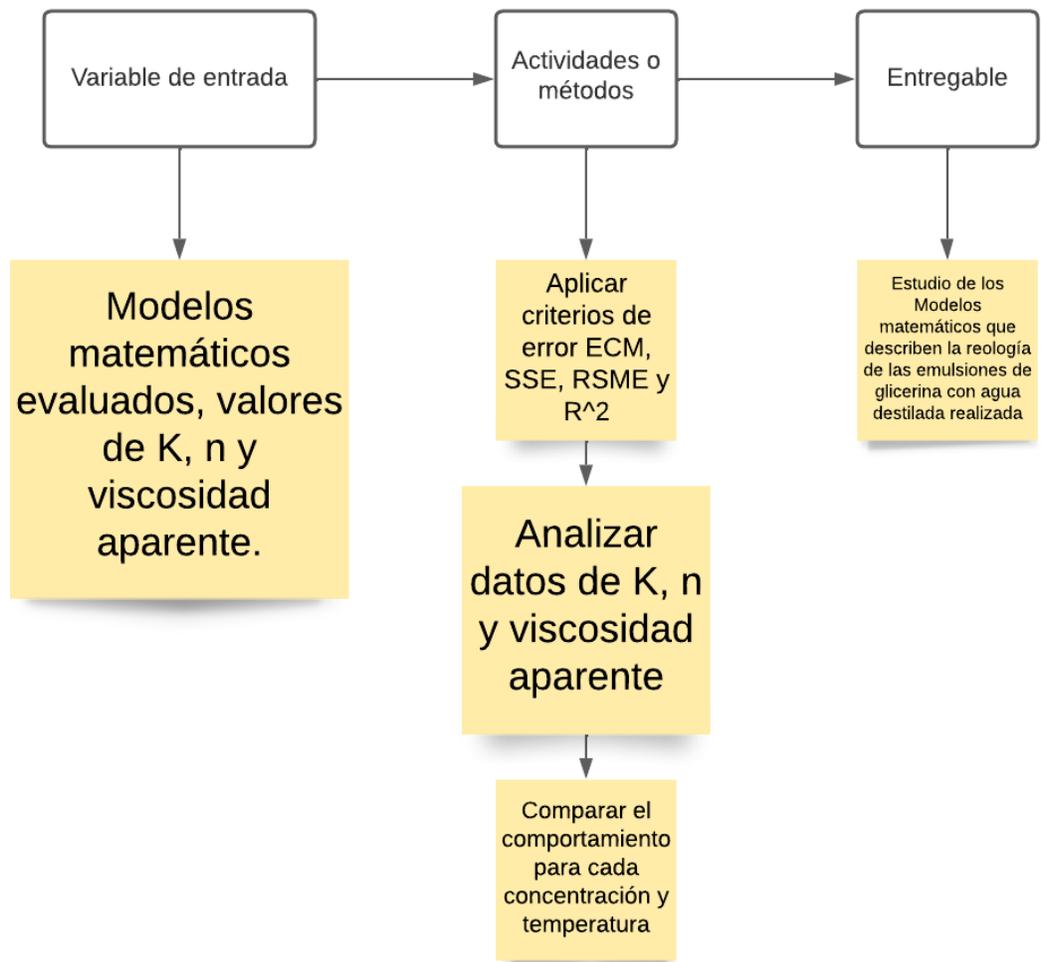


Figura 1.4: Diagrama de flujo "Estudio de modelos matemáticos de Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson para el estudio reológico que rigen fluidos No Newtonianos"

Cronograma de actividades

Limpieza y preparación de la zona de trabajo e implementos a utilizar (Etapa 0)

- 0.1) 2 vasos de 500 mL.
- 0.2) 3 vasos precipitados de 250 mL.
- 0.3) Cuchara metálica acero inoxidable.

Preparación de implementos electrónicos. (Etapa 1)

- 1.1) Reómetro Rotavisc Lo-Vi: Encendido del aparato, calibración de posición del aparato y del soporte para husillo.
- 1.2) Pesa digital: Encendido del aparato, calibración de la medida inicial (marcar pesaje de 0 cuando no tenga nada encima de la pesa)
- 1.3) Fuente de control Isotérmico: Se debe encender y configurar la temperatura de control según el análisis a realizar.

Preparación de Mezcla o Emulsión. (Etapa 2)

- 2.1) Según porcentaje de glicerina: Para crear le emulsión con la concentración deseada, se ingresa al vaso precipitado 450 mL de glicerina como medida base para crear emulsiones de alta concentración de glicerina, o se estima la glicerina necesaria para realizar emulsiones de bajas concentraciones de glicerina.
- 2.2) Según porcentaje de agua destilada: Para crear le emulsión con la concentración deseada, se ingresa al vaso precipitado 450 mL de agua destilada como medida base para crear emulsiones de alta concentración de agua destilada, o se estima el agua destilada necesaria para realizar emulsiones de bajas concentraciones de agua destilada.
- 2.3) Pesaje: se pesa la emulsión realizada. (Etapa 3)
- 2.4) Medición volumétrica: se estima el volumen de la emulsión realizada y pesada, mediante la medición apreciable observando el vaso precipitado.

Montaje para análisis de mezcla o emulsión. (Etapa 3)

- 3.1) Emulsión: Poner vaso con mezcla en la posición que indica el reómetro
- 3.2) Husillo: Sumergir el husillo a utilizar en el análisis en la mezcla de manera diagonal en 45°.
- 3.3) Posición de husillo en la mezcla: Luego de sumergir el husillo, montar en la unión de conexión del Reómetro para el husillo.
- 3.4) Altura de husillo en la mezcla: Ajustar la altura del husillo hasta que la emulsión toque la marca indicada por el husillo.

Control de Temperatura. (Etapa 4)

- 4.1) Hervir agua en el hervidor: Hervir agua cuantas veces sea necesario, se utiliza para controlar la temperatura del agua en la fuente isotérmica.
- 4.2) Fuente Isotérmica: Ingresar agua hervida en la fuente isotérmica.
- 4.3) Control de temperatura: Cuando la temperatura de la mezcla alcanza los valores deseados, aplicar agua fría en la fuente hasta lograr la misma temperatura en la fuente. La lectura de temperatura de la mezcla la entrega el Reómetro y la lectura de temperatura del agua para el ambiente en que se sumerge la mezcla la entrega la fuente.

Toma de datos. (Etapa 5)

- 5.1) Configurar programa: Se crea programa de lectura continua, para lectura de cada temperatura en distintas velocidades de giro de husillo durante un tiempo determinado (2 minutos).
- 5.2) Accionar programa: Se da encendido al programa y se configura para que sea o en Loop infinito o solo sea accionado en cierta cantidad de ciclos.
- 5.3) Control de temperatura: Cuando la temperatura de la mezcla vaya aumentando o disminuyendo, aplicar agua helada o caliente, según sea el caso a la fuente isotérmica para mantener un margen de error en la temperatura en estudio de no más de 1,5°C.

- 5.3) Tomar datos: Se toman datos cada 30 segundos, una vez completado el programa, repetir 2 veces más para tener como un mínimo de 6 datos representativos.
- 5.4) Datos representativos: Considerar solo los datos que más se repitan y se ajusten a la curva de comportamiento.

Evaluación de datos. (Etapa 6)

- 6.1) Velocidad de corte: Esta depende del recorrido ejercido por la sección de área en contacto con la emulsión, la cual depende a su vez de las dimensiones de la sección más amplia del husillo y de la velocidad de giro que tenga en cada instante.
- 6.2) Esfuerzo de corte: se obtiene mediante la velocidad de corte para cada instante.
- 6.3) Margen de error: Mediante la tabla de distribución Z y con un intervalo de confianza del 95% se obtienen márgenes de error para cada velocidad de giro, concentraciones de emulsión y temperaturas.

Graficar datos. (Etapa 7)

- 7.1) Viscosidad mPa-s v/s RPM: Se realizan gráficas para cada concentración de emulsión a distintas temperaturas.
- 7.2) Velocidad de corte (1/s) v/s Esfuerzo de corte (Pa): Se realizan gráficas para cada concentración de emulsión a distintas temperaturas.
- 7.3) Reogramas de concentración y las 4 temperaturas en estudio: Se realizan Reogramas al graficar conjuntamente las gráficas de Viscosidad mPa-s vs RPM de todas las evaluaciones a la misma temperatura, generando 4 Reogramas (a 20°C, 30°C, 40°C y 50°C).
- 7.4) Reogramas de concentración vs viscosidad a las 4 temperaturas en estudio: Se realizan Reogramas al graficar conjuntamente las gráficas de Concentración vs Viscosidad de todas las evaluaciones a la misma temperatura, generando 4 Reogramas (a 20°C, 30°C, 40°C y 50°C).

Evaluar error de datos. (Etapa 8)

- 8.1) Error medio (EME): Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas.
- 8.2) Error cuadrático (EC): Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas
- 8.3) Error cuadrático medio (ECM): Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas
- 8.4) Error estándar: Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas
- 8.5) SSE: Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas. Además, se aplica para estudiar los valores obtenidos mediante los modelos matemáticos de Ley de Potencia, Herschel – Bulkley y Casson.
- 8.6) RMSE: Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas. Además, se aplica para estudiar los valores obtenidos mediante los modelos matemáticos de Ley de Potencia, Herschel – Bulkley y Casson.
- 8.7) Coeficiente de regresión R^2 : Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas. Además, se aplica para estudiar los valores obtenidos mediante los modelos matemáticos de Ley de Potencia, Herschel – Bulkley y Casson.
- 8.8) Parámetro Chi Cuadrado calculado X^2 : Aplicado a la toma de datos de viscosidad de las muestras de emulsión a distintas concentraciones y temperaturas.

Determinación de parámetros reológicos. (Etapa 9)

- 9.1) Ley de Potencia: el valor de “n” se obtiene mediante el término “a” que acompaña a la X en la ecuación de la curva que describe el comportamiento. Este valor es representativo para cada tipo de concentración y temperatura, por lo que va cambiando según el comportamiento de la curva obtenida para cada estudio y muestra

de emulsión. Al obtener n , el valor de K se obtiene despejando en el modelo matemático.

9.2) Herschel-Bulkley: Se utiliza el mismo valor de “ n ” aplicado en ley de la potencia, el valor τ_0 hace referencia a un valor de esfuerzo de corte constante aplicado para todo el estudio.

9.3) Casson: Combinamos los valores obtenidos en ley de la potencia y Herschel-Bulkley.

9.5) Obtención de índice de consistencia K : Este se obtiene en función de la temperatura, concentración, el efecto combinado de la temperatura y la concentración y los modelos matemáticos de Ley de la Potencia, Herschel-Bulkley y Casson

9.6) Obtención de índice de Viscosidad aparente η_{app} : Este se obtiene en función de la temperatura.

Análisis estadístico. (Etapa 10)

10.1) Análisis de parámetros Reológicos.

Resultados y discusión de cada paso (desde el paso 1 al 10). (Etapa 11)

11.1) Comportamiento reológico: Resultados y discusión de los índices de consistencia “ k ” e índice de flujo “ n ”. Reogramas, Parámetros reológicos de ley de la potencia, Herschel-Bulkley y Casson para todas las muestras de emulsión (a diferentes temperaturas y concentraciones).

11.2) Análisis estadístico: Se presentan los errores de los modelos matemáticos aplicados y los errores de los datos obtenidos.

11.3) Parámetros reológicos según modelo matemático: Se presentan resultados comparativos de las concentraciones, temperaturas, viscosidad aparente η_{app} (mPa-s), índice de flujo “ n ” y el Coeficiente de consistencia “ k ”.

11.5) Efecto de la concentración y la temperatura: Se presentan los efectos que tiene la temperatura sobre el índice de comportamiento del flujo “ n ” e índice de consistencia “ k ”.

Conclusiones. (Etapa 12)

- Obtener parámetros reológicos mediante los modelos matemáticos Ley de la Potencia, Herschel - Bulkley y Casson que rigen fluidos No Newtonianos.
- Crear Reogramas mediante datos reológicos que describan el comportamiento del coeficiente de consistencia “k”, índice de flujo “n” y viscosidad aparente en función de las temperaturas.

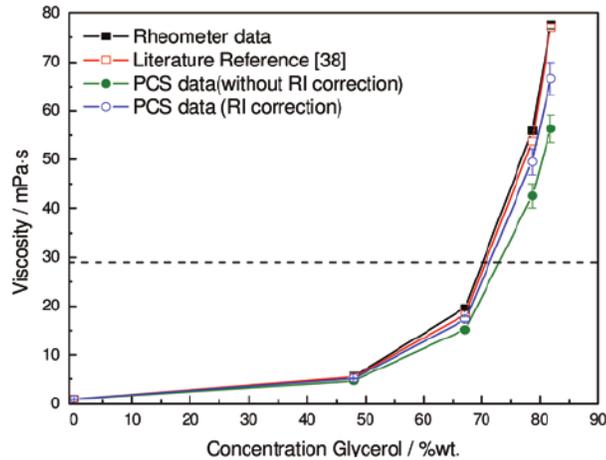
4.1.2. Comparación entre los datos de viscosidad experimentales y fundamentos de literatura.

Para obtener el valor de la viscosidad de cada concentración, para cada temperatura, se realizan estudios reológicos con diferentes velocidades de husillo, con cambios de intervalos de 10 RPM. De esta manera podemos crear valores de la viscosidad para cierta concentración y temperatura respectiva, con 9 distintos rangos de velocidad para la toma de la muestra.

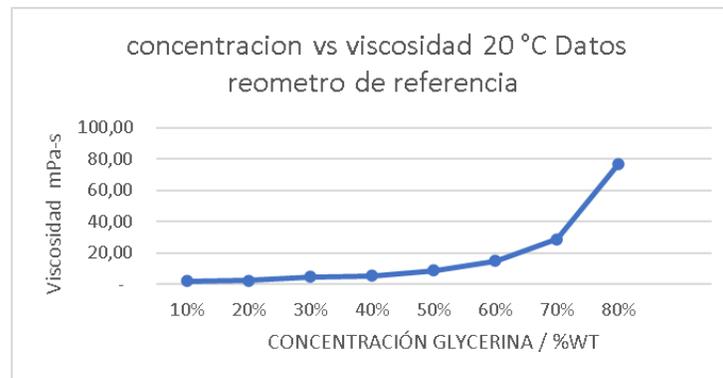
Esto quiere decir, que cada vez que se realiza un estudio con un rango de velocidad de 10 a 100 RPM y con intervalos de 10 RPM, podemos obtener un valor de la viscosidad para la creación de datos.

El rango de error para cada valor obtenido depende de la relación entre la velocidad de giro del husillo utilizado en el estudio, la temperatura y la concentración de la emulsión estudiada.

Como literatura de referencia para comparar los datos obtenidos, se utilizaron 3 fuentes que representaban distintos métodos de análisis. En la gráfica 3.1 podemos apreciar un reograma que presenta 4 tipos de referencias distintas, de las cuales solo se utilizó la referente a los datos obtenidos mediante reómetro, que fueron presentados en la gráfica 3.2. Cabe considerar que estos datos obtenidos mediante reómetro, solo fueron estudiados a la temperatura de 20°C.

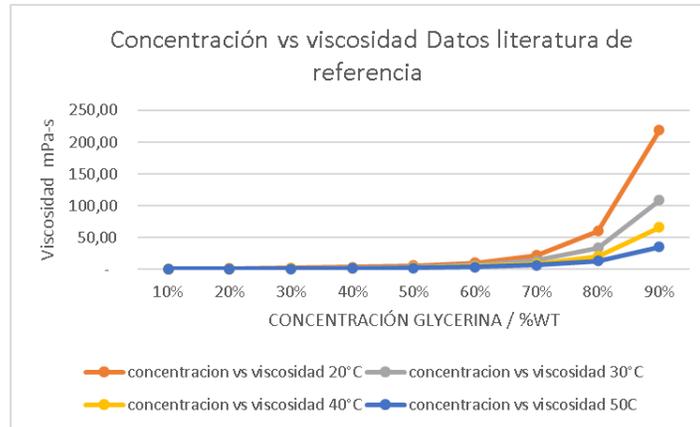


Gráfica 3.1 Reograma de referencia “Concentración (Glicerina/ % a agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C. (Wagner et al., 2012)



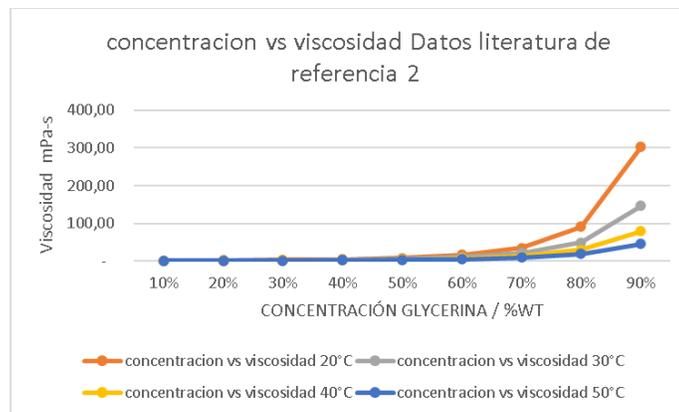
Gráfica 3.2 Reograma literatura de referencia “ Rheometer Data - Concentración (Glicerina/ % a agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 80% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C. (Wagner et al., 2012)

Mediante tabla de propiedades de glicerol se obtienen valores de viscosidad para cada concentración y 4 temperaturas, por lo que la gráfica 3.3 nos permite comparar estos datos para los casos de temperatura a 30°C, 40°C y 50°C que no logran cubrir los datos representados en la gráfica 3.2.



Gráfica 3.3 Reograma literatura de referencia “Concentración (Glicerina/ % a gua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionada con a gua destilada a temperatura constante de 20°C.(Barnes, 2000)

La gráfica 3.4 corresponde a datos de literatura que fueron obtenidos teóricamente mediante simulación por computadora, por lo que con ella podemos relacionar cómo se comportan los datos experimentales en relación con los teóricos.



Gráfica 3.4 Reograma literatura de referencia 2 “Concentración (Glicerina/ % a gua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionada con a gua destilada a temperatura constante de 20°C.(Department of Meteorology, 2018)

4.1.3. Creación de Reogramas que describan el comportamiento de datos reológicos

Dimensionamiento de husillo y relación con el esfuerzo de corte

El esfuerzo de corte fue obtenido mediante relación de las constantes geométricas del husillo utilizado para cada análisis, esto debido a que su sección de área se encuentra en contacto con el fluido en estudio.

Viscosidad

Se obtiene mediante pantalla del reómetro en mPa-s como unidad de medida. Para cada muestra y temperatura, se obtuvieron valores de la viscosidad con una tendencia que indicaba un margen para valorizar la viscosidad. (G20)

Se utilizaron como datos de referencia 3 fuentes de literatura en la que (Wagner et al., 2012) entrega datos para diferentes viscosidades en función de la velocidad RPM a una temperatura constante de 20°C y mediante utilización de un reómetro. Lo dispuesto por (Barnes, 2000) es una guía detallada de las propiedades de la glicerina y contempla valores de emulsiones a distintas temperaturas y concentraciones, sin embargo los datos que representa no fueron obtenidos mediante reómetro rotacional y solo se limita a referencias como propiedades de emulsiones. Para el caso de valores teóricos obtenidos mediante simulación computacional (Department of Meteorology, 2018) entrega un programa en el cual es posible obtener los valores de viscosidad dinámica, densidad, cinemática, entre otras propiedades de la emulsión, solo ingresando las cantidades de emulsión requeridas para el estudio.

Velocidad de corte $\dot{\gamma} \left(\frac{1}{s}\right)$ vs esfuerzo de corte τ (Pa)

Para el husillo SP-1 el perímetro es de 0,0590621 mts, donde cada 2 minutos se puede representar el valor de la muestra obtenido, por lo que para el caso de 10 rpm, el recorrido sería

$$0,0590621 \text{ (mt)} * \left(\frac{10 \text{ revoluciones}}{1 \text{ minuto}}\right) (2 \text{ minutos}) = 1,1812416 \text{ (mt)}$$

Luego obtenemos la velocidad de giro necesaria para lograr ese recorrido en 2 minutos, que es equivalente a 120 segundos

$$\text{velocidad de giro} \left(\frac{\text{mt}}{\text{seg}}\right) \frac{1,1812416 \text{ mt}}{120 \text{ segundos}} = 0,0098437 \left(\frac{\text{mt}}{\text{seg}}\right)$$

Para obtener la velocidad de corte se relaciona la velocidad de giro (mt/seg) con la dimensión de la sección que se encuentra realizando el corte con el fluido, que en el caso de un husillo, vendría siendo su altura h.

$$\dot{\gamma} \left(\frac{1}{s}\right) = \text{velocidad de giro} \left(\frac{\text{mt}}{\text{seg}}\right) * \text{sección de corte } h \text{ (mt)} = \frac{1}{\text{seg}}$$

Para el caso de un husillo SP-1 la altura de la sección h es de 0,0651 mt.

$$\dot{\gamma} \left(\frac{1}{s}\right) = 0,0098437 \left(\frac{\text{mt}}{\text{seg}}\right) * 0,0651 \text{ (mt)} = 0,1512086 \left(\frac{1}{\text{seg}}\right)$$

El esfuerzo de corte se obtiene aplicando la ley de Newton relacionando la velocidad de corte del husillo con la viscosidad obtenida que en este caso se encuentra en mPa-s (mPa*segundo).

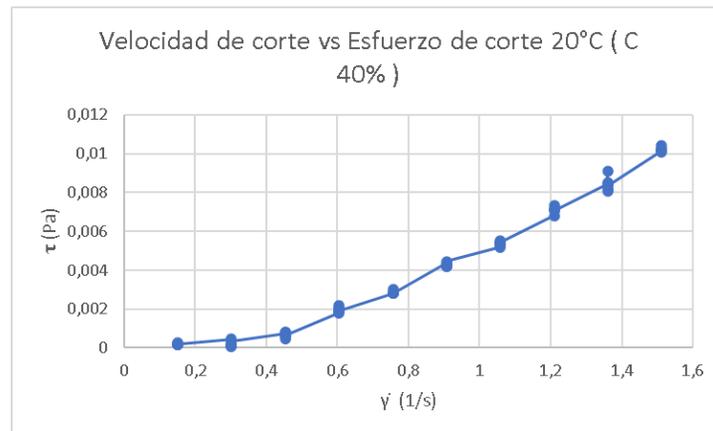
Por lo que para nuestro caso anterior el esfuerzo de corte sería τ (mPa)

$$\tau \text{ (mPa)} = 0,1512086 \left(\frac{1}{s}\right) * 1,5 \text{ (mPa} - \text{s)} = 0,2268129 \text{ (mPa)}$$

donde 1 milipascal (mPa) = a 0,001 Pascal (Pa)

$$0,2268129 \text{ (mPa)} = 0,0002268129 \text{ (Pa)}$$

Al graficar todos los valores obtenidos para cada toma obtenemos el reograma que relaciona el esfuerzo de corte con la velocidad de corte.



Gráfica 3.5 Reograma Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C

El estudio reológico mediante reómetro, nos permite obtener valores de viscosidad en función de la velocidad de giro del husillo, sin embargo, para obtener el comportamiento reológico es necesario evaluar de forma gráfica los datos de viscosidad en función de la velocidad de corte y la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte que tuvo la interfaz entre el husillo en contacto con el fluido o mezcla en estudio.

Considerando el tiempo en que estuvo sometido el giro de husillo en el estudio reológico, es posible obtener el recorrido que tiene la sección de área de contacto del husillo sumergido en el líquido en estudio, de esta manera es obtenemos una relación de distancia y velocidad, con la cual calculamos la velocidad de corte de referencia para el estudio y con ella obtener el esfuerzo de corte para cada situación.

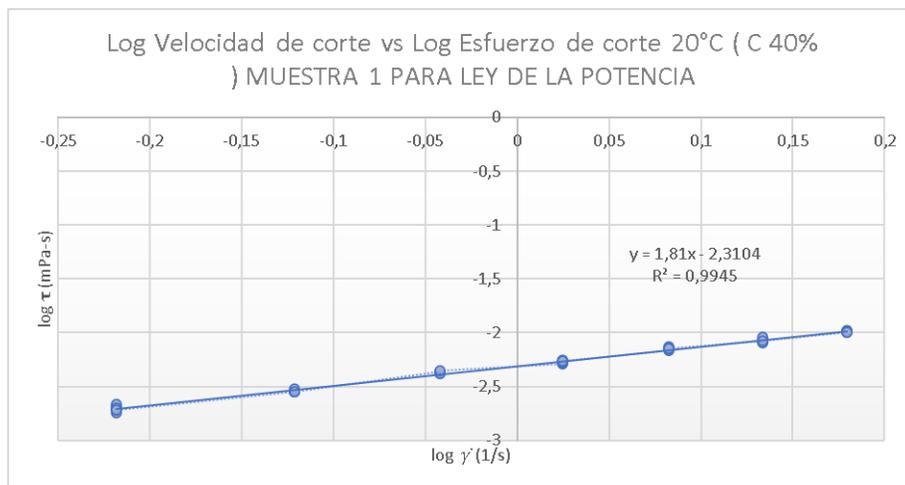
Obtener el esfuerzo de corte y la velocidad de corte del husillo sumergido en el líquido es necesario para poder comprender el comportamiento de los fluidos en función de los modelos matemáticos y la relación gráfica entre la viscosidad y la velocidad de corte, como también la relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte.

La relación entre el esfuerzo de corte y la velocidad de corte, como también la relación entre la viscosidad y la velocidad de corte, nos permiten entender de forma gráfica el tipo de comportamiento que tiene el fluido o mezcla en estudio. Entendiendo el tipo de comportamiento reológico tiene el fluido, es posible aplicar diferentes modelos matemáticos para comprender aún más su comportamiento.

4.1.4. Obtención de parámetros reológicos mediante modelos matemáticos Ley de la Potencias, Herschel – Bulkley y Casson.

Ley de la potencia

Aplicando el logaritmo en base 10 de la relación τ (Pa)/ $\dot{\gamma}$ (1/s), podemos obtener los coeficientes de flujo “n” y el coeficiente de consistencia “k”.



Gráfica 3.6 Reograma Ley de potencia Logaritmo de Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C

Los valores de índice de consistencia (n) a 20°C de una concentración de 40% glicerina y 60% agua destilada se obtiene de la gráfica tomando en cuenta la ecuación de la ley de la potencia aplicada para fluidos pseudoplásticos.

Pendiente (n) = 1,181

Para el cálculo del índice de consistencia (k) a 20°C, de acuerdo a la aplicación de logaritmos de la ley de la potencia obtenemos;

$$\tau = k\gamma^n$$

$$\log \tau_0 = \log k + n \log \gamma_w$$

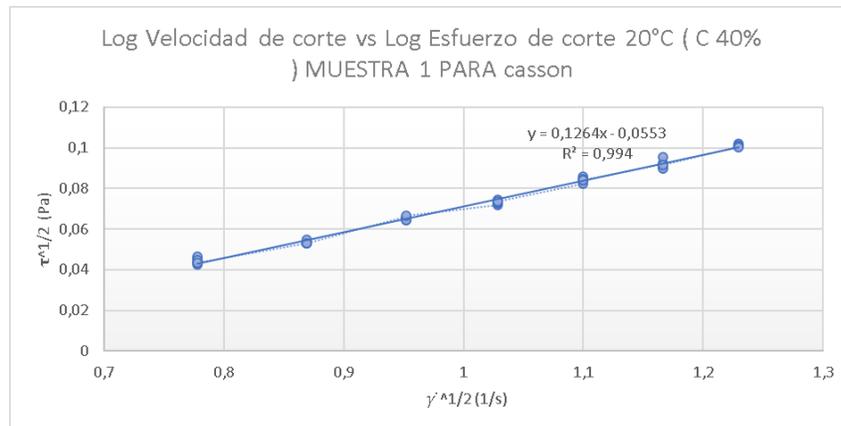
$$\log \tau_0 = \log(2,3104) + 1,181 \log \gamma_w$$

$$k = \text{antilog } 2,3104$$

$$k = 204,36193$$

Casson

Aplicando la raíz cuadrada de la relación τ (Pa)/ $\dot{\gamma}$ (1/s), podemos obtener los coeficientes de flujo “n”, esfuerzo cortante inicial τ_0 y el coeficiente de consistencia “k”.



Gráfica 3.7 Reograma Casson Raíz cuadrada de Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C

Los valores de índice de consistencia (n) a 20°C de una concentración de 40% glicerina y 60% agua destilada se obtiene de la gráfica tomando en cuenta la ecuación de la ley de la potencia aplicada para fluidos pseudoplásticos.

$$n (\text{cte}) = 0,5$$

$$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + k\gamma^{0,5}$$

Pendiente (k) = 0,1264

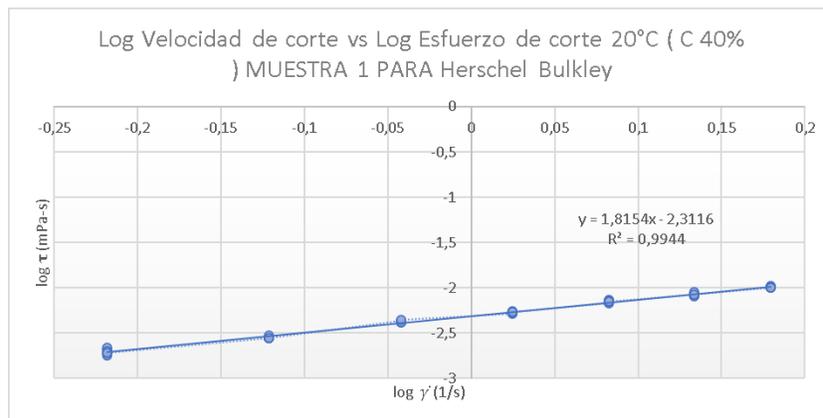
Intercepto ($\tau_0^{0,5}$) = 0,0553

Umbral de fluencia ($\tau_0^{0,5}$) = 0,0553²

Umbral de fluencia (τ_0) = 0,00305809 [Pa^{0,5}]

Herschel Bulkley

Aplicando el logaritmo en base 10 de la relación τ (Pa)/ $\dot{\gamma}$ (1/s), podemos obtener los coeficientes de flujo “n” y el coeficiente de consistencia “k”. El esfuerzo cortante inicial τ_0 es el esfuerzo cortante que ocurre en el instante 0 del estudio, es decir, cuando se encuentra detenido, por lo tanto, se obtiene mediante las constantes geométricas.



Gráfica 3.8 Reograma Herschel– Bulkley Logaritmo Velocidad de corte vs Esfuerzo de corte, Concentración de 40% glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C

Para el cálculo del índice de consistencia (k) a 20°C, de acuerdo a la aplicación de logaritmos de Herschel - Bulkley obtenemos;

$$\tau - \tau_0 = k\gamma^n$$

$$\log(\tau - \tau_0) = \log k + n \log \gamma_w$$

$$\log(\tau - 1,21744 * 10^{-5}) = \log(2,3116) + (1,8154) \log \gamma_w$$

Pendiente (n) = 1,8154

Intercepto (k) = 2,3116

Intercepto (k) = antilog(2,3116)

Intercepto (k) = 204,92739

4.1.5. Análisis estadístico

Luego de analizar los datos obtenidos con modelos matemáticos que describen el comportamiento de los fluidos, se aplican modelos estadísticos de estudio de error, de esta manera podemos evaluar qué modelo representa de mejor manera cada muestra en estudio y para cada tipo de comportamiento reológico, en función de sus concentraciones, velocidad de giro de husillo y temperaturas.

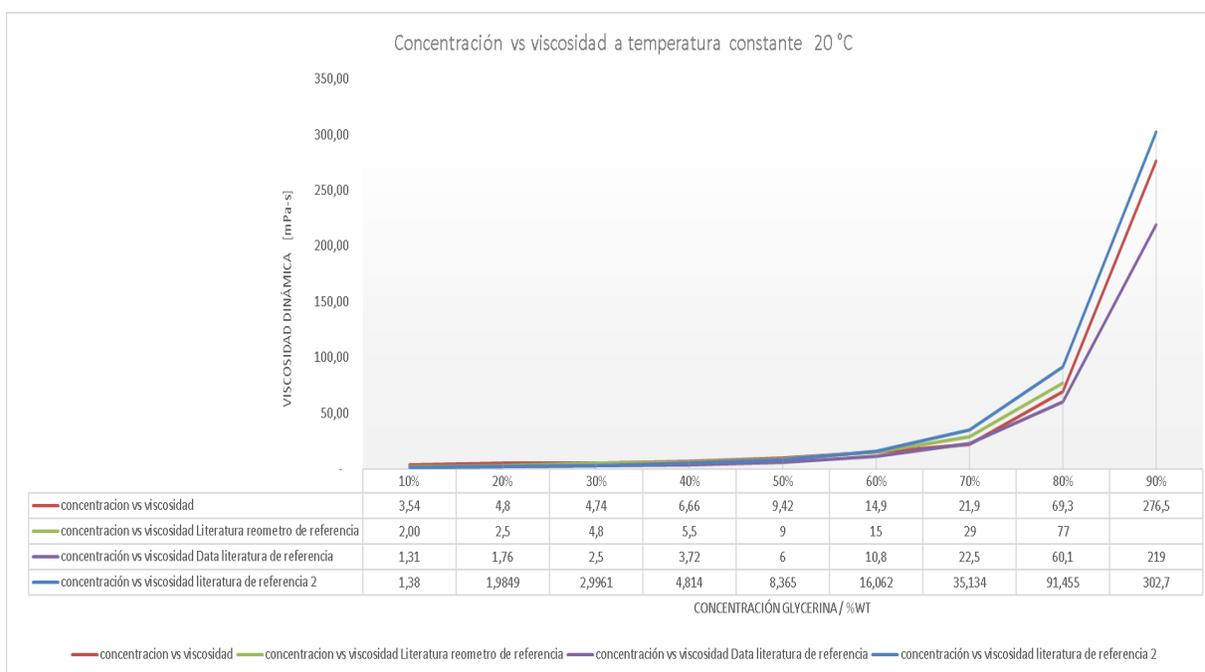
Para evaluar cada uno de las muestras se debe realizar una evaluación estadística de los datos creados referentes a viscosidades vs RPM en los que se utilizan los modelos de evaluación de error mediante Sse; Rsme, Eme, Chi Cuadrado y R².

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

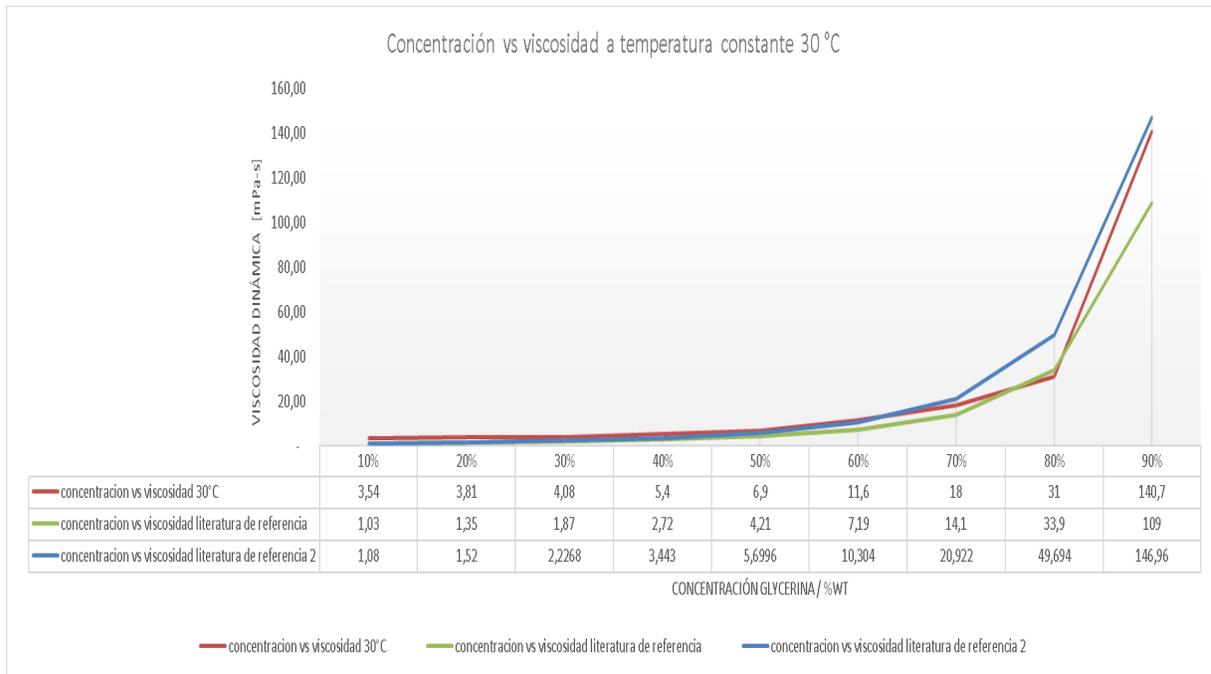
4.1 Comportamiento reológico de las emulsiones Glicerina/ % agua

En la gráfica 4.1 se aprecia el reograma que representan los datos creados mediante el reómetro Rotavisc Lo-vi, utilizando el husillo SP-1 que describe el comportamiento de la viscosidad mPa-s en función de la concentración. Se observa que la viscosidad tiene una tendencia en sus valores en la que la curva se vuelve pronunciada luego de que la emulsión supera el 60% de concentración de glicerina. Se observa que a medida que bajan las concentraciones de glicerina (menores al 30 % de glicerina/ agua) y aumentan el porcentaje de agua, la viscosidad tiende a acercarse a 0.



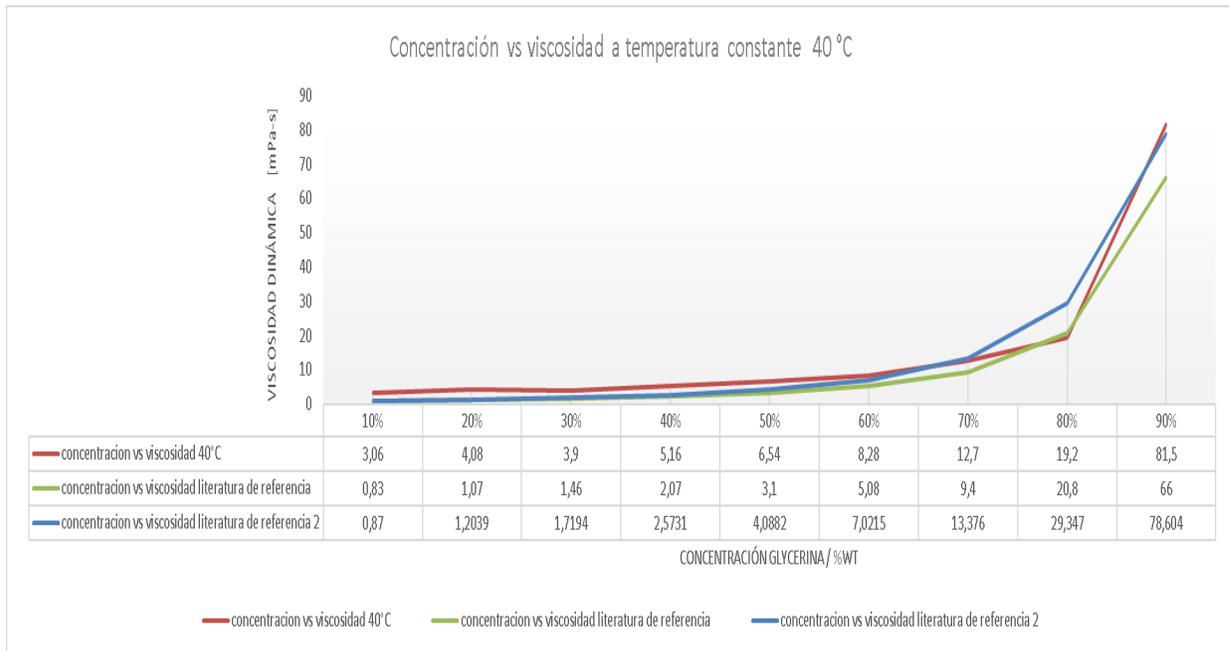
Gráfica 4.1 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C. Literatura reómetro (Wagner et al., 2012), Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).

En la gráfica 4.2 se observa que la viscosidad tiene una tendencia en sus valores en la que la curva se vuelve pronunciada luego de que la emulsión supera el 50% de concentración de glicerina. Se observa que a medida que bajan las concentraciones de glicerina (menores al 40 % de glicerina/ agua) y aumentan el porcentaje de agua, la viscosidad tiende a acercarse a 0.



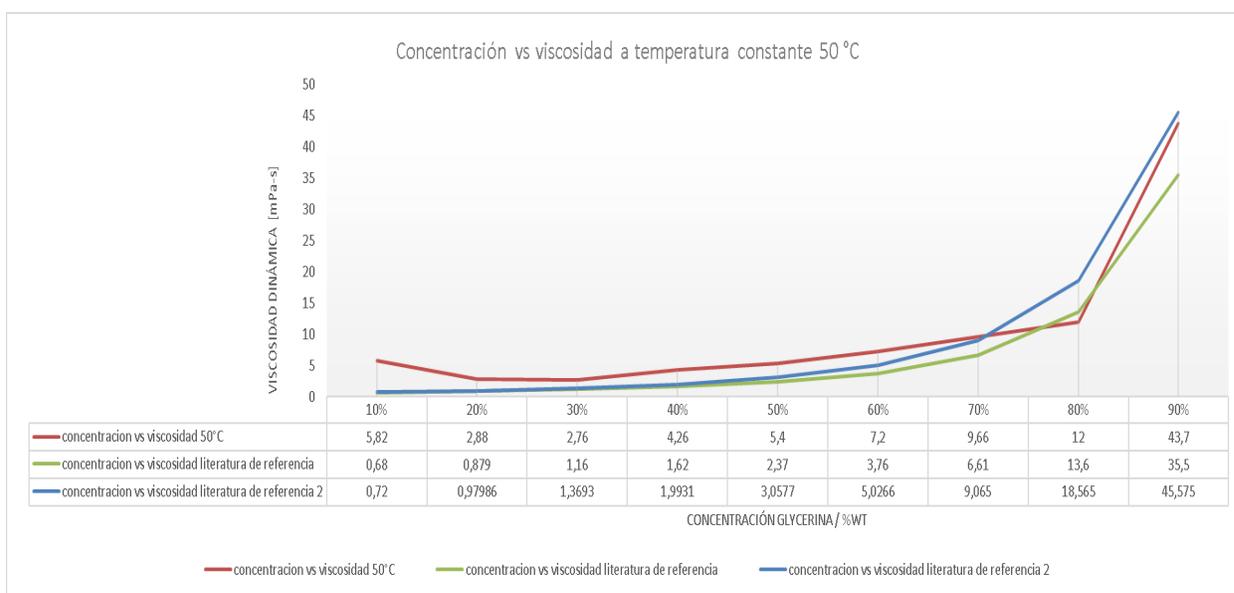
Gráfica 4.2 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 30°C. Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).

En la gráfica 4.3 se observa que la viscosidad tiene una tendencia en sus valores en la que la curva se vuelve pronunciada luego de que la emulsión supera el 50% de concentración de glicerina. Se observa que a medida que bajan las concentraciones de glicerina (menores al 50 % de glicerina/ agua) y aumentan el porcentaje de agua, la viscosidad tiende a acercarse a 0.



Gráfica 4.3 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 40°C. Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).

En la gráfica 4.4 se observa que la viscosidad tiene una tendencia en sus valores en la que la curva se vuelve pronunciada luego de que la emulsión supera el 80% de concentración de glicerina. Se observa que a medida que bajan las concentraciones de glicerina (menores al 70 % de glicerina/ agua) y aumentan el porcentaje de agua, la viscosidad tiende a acercarse a 0. Para las 4 temperaturas ocurre que los valores de la viscosidad tienen la misma tendencia que los valores de referencia, sin embargo, son levemente mayores a excepción de la emulsión de 80% de glicerina la cual es levemente menor que los valores de referencia, esta excepción ocurre en los 4 casos de temperaturas representados en cada reograma.



Gráfica 4.4 Reograma comparativo “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa·s”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 50°C. Literatura de referencia (Barnes, 2000) y literatura de referencia 2 (Department of Meteorology, 2018).

4.2 Comportamiento reológico del coeficiente de consistencia “k” en función de las temperaturas.

En los siguientes reogramas se considera que cada tipo de emulsión fue representada numéricamente por

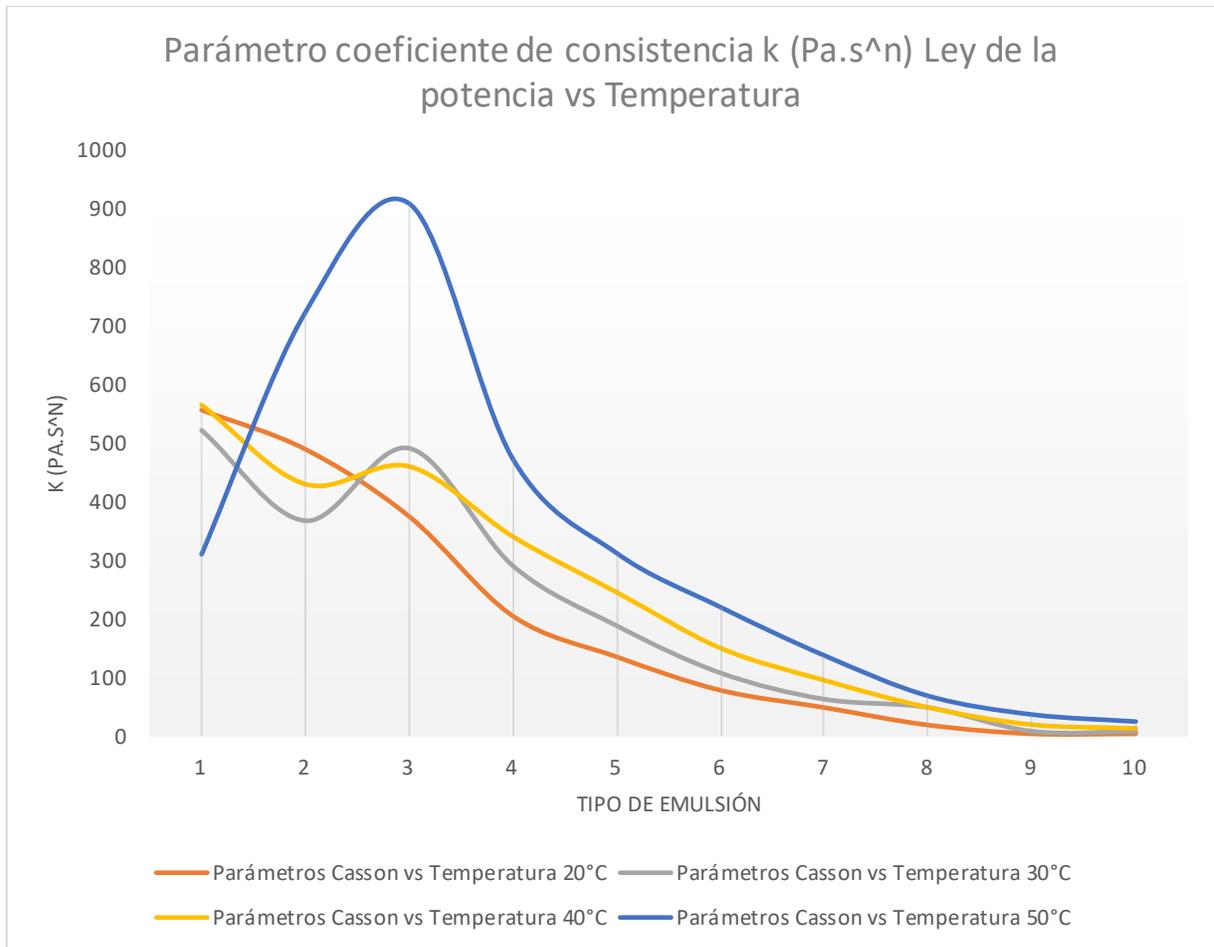
Tabla 3 Enumeración para emulsiones en reogramas

Número	Emulsión
1	concentración 90% glicerina 10 % de agua destilada.
2	concentración 80% glicerina 20 % de agua destilada.
3	concentración 70% glicerina 30 % de agua destilada.
4	concentración 60% glicerina 40 % de agua destilada.
5	concentración 50% glicerina 50 % de agua destilada.
6	concentración 40% glicerina 60 % de agua destilada.
7	concentración 30% glicerina 70 % de agua destilada.
8	concentración 20% glicerina 80 % de agua destilada.
9	concentración 10% glicerina 90 % de agua destilada.
10	concentración 10% glicerina 90 % de agua destilada (Ajustado).

Para el caso del modelo matemático de ley de la potencia representado en la gráfica 4.5, podemos apreciar que, en concentraciones altas de glicerina, el intervalo de valor que puede tomar nuestro coeficiente de consistencia k es hasta 4 veces mayor que en las emulsiones menores al 70% de concentración de glicerina, en los que su valor aumenta con el aumento de la temperatura aplicada.

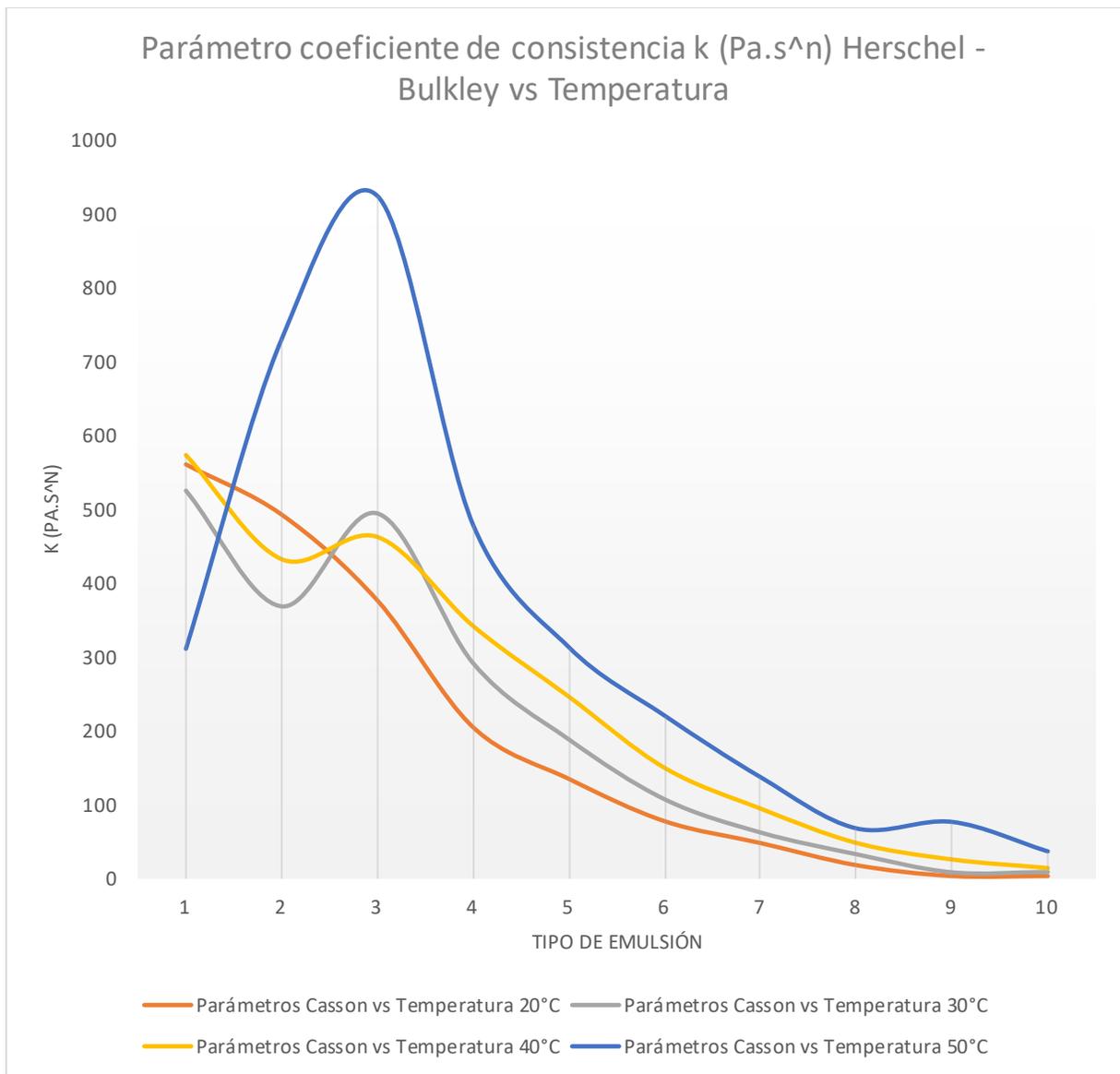
En las emulsiones entre el 40% y 90% de glicerina en la emulsión los coeficientes de consistencia k se mantuvieron con tendencias de sus curvas similares entre sí, independiente de las temperaturas y concentraciones aplicadas.

En las emulsiones de 10%, 20% y 30% el coeficiente de consistencia k , su valor aumenta considerablemente con el aumento de la temperatura aplicada.



Gráfica 4.5 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.sⁿ) Ley de la potencia vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.

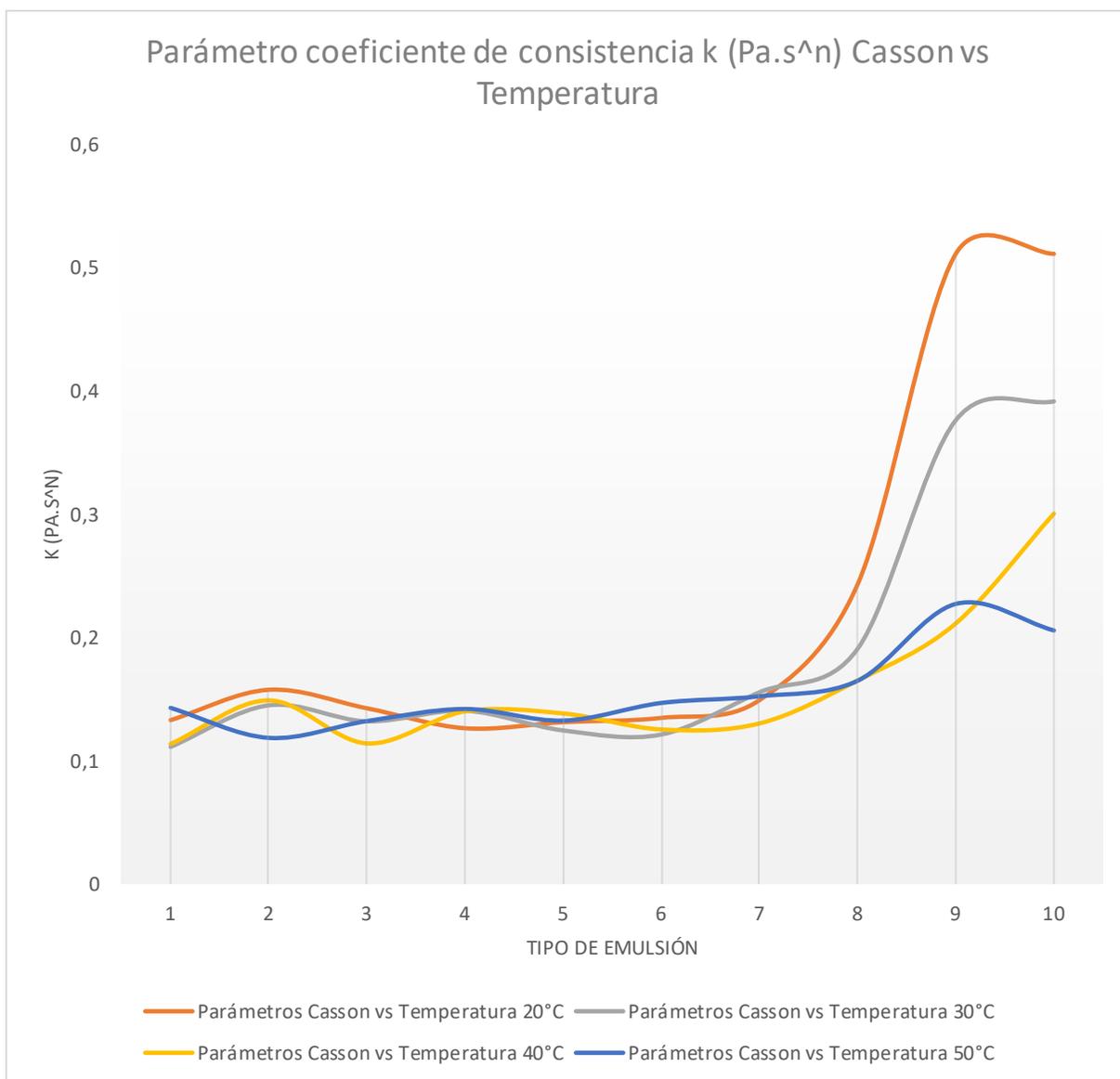
Para el caso del modelo matemático de Herschel – Bulkley representado en la gráfica 4.6, podemos apreciar que, en la emulsión 3, y temperatura de 50°C el intervalo de valor que puede tomar nuestro coeficiente de consistencia k es alto (cercano a 300 Pa.sⁿ) en relación que el resto de las concentraciones (menores a 10 Pa.sⁿ), lo mismo ocurre a los 30°C donde su peak ocurre con la emulsión 4. A los 40°C el peak ocurre en la emulsión 7 y a los 20°C ocurre en las emulsiones 9 y 10. En las emulsiones 9 y 10, a pesar de que son la misma concentración, la diferencia del valor de consistencia k aumenta a medida que la temperatura aumenta, siendo levemente mayor a los 50°C y 40°C que a los 20 °C y 30°C.



Gráfica 4.6 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.sⁿ) Herschel - Bulkley vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.

Para el caso del modelo matemático de Casson representado en la gráfica 4.7, se aprecia que la emulsión 4 ocurre un comportamiento excepcional la tendencia de sus concentraciones. El modelo de Casson representa de manera gráfica que el coeficiente de consistencia k tiene comportamientos que se mantiene en valores en un rango estable, hasta que la concentración

de glicerina es menor al 20% que corresponde a las emulsiones 9 y 10. La emulsión 9 tiene valores de consistencia k mayores que la emulsión 10 en las temperaturas de 50°C , para los 20°C y 30°C se mantiene similar, y para la temperatura de 40°C tiende a ser menor que la emulsión 10.

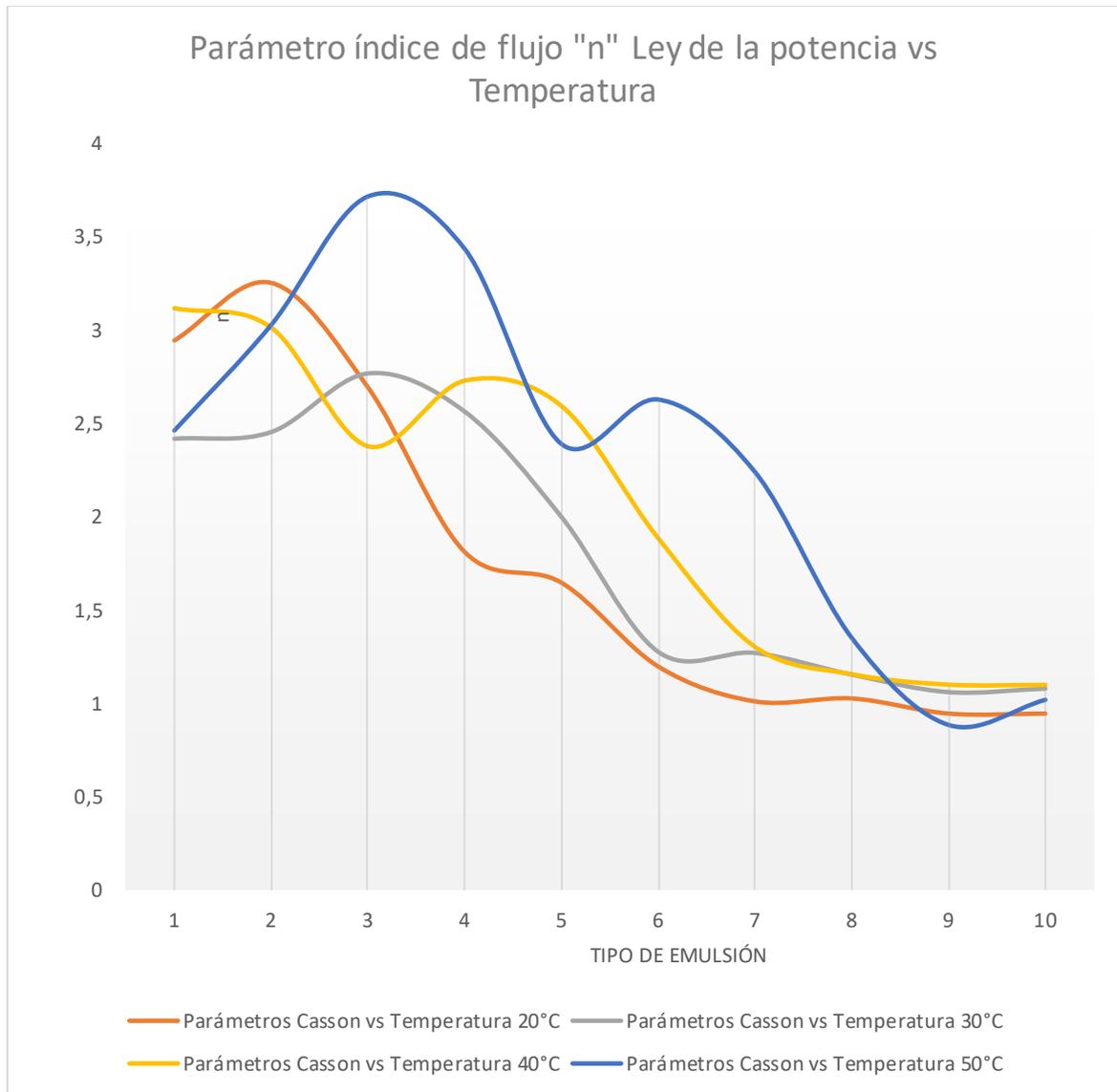


Gráfica 4.7 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.sⁿ) Casson vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.

Para los casos de la ley de la potencia de la gráfica 4.64 es posible apreciar que el coeficiente de consistencia k , en el único caso en que su valor tiende a bajar es para una alta concentración de glicerina a una alta temperatura (50°C) por lo que a dicha temperatura la emulsión tiende a tener un comportamiento con menor resistencia a fluir en un medio. Lo mismo se aprecia para el caso de estudio mediante Herschel – Bulkley en la gráfica 4.65, sin embargo, además se incluye que para la concentración de un 80% también disminuye abruptamente su valor.

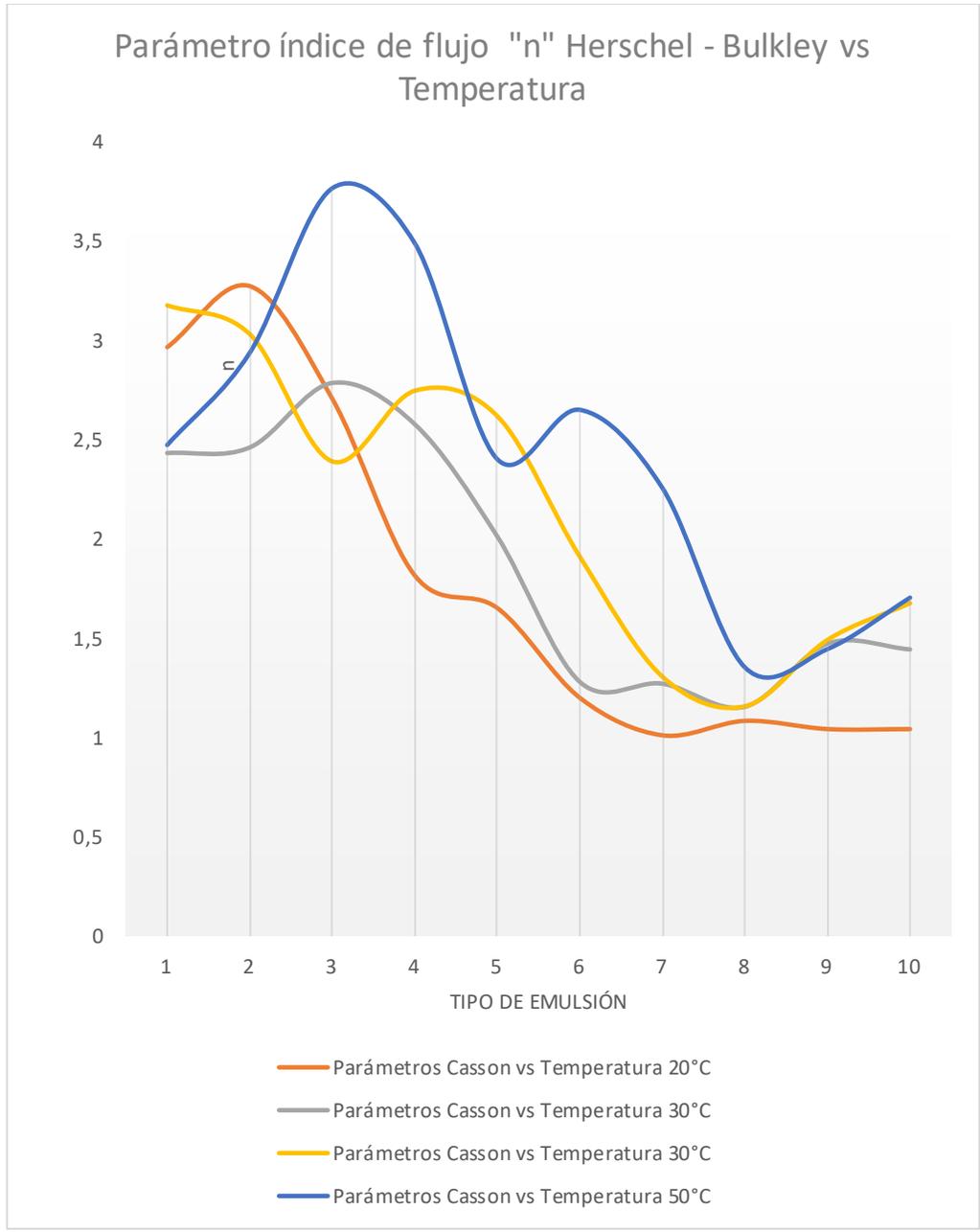
4.3 Comportamiento reológico del índice de flujo “n” en función de las temperaturas.

Referente a los parámetros expresados en el punto 4.41 se aprecia que, a concentraciones altas de glicerina, el coeficiente de consistencia k disminuye a medida que aumenta la temperatura. Sin embargo, en todos los casos estudiados y con los diferentes modelos matemáticos respectivos se aprecia que el coeficiente de flujo n , aumenta a medida que aumenta la temperatura. En la gráfica 4.8 se observa que el coeficiente de flujo disminuye a medida que aumenta la concentración de glicerina en la emulsión, además se aprecia que a altas temperaturas el coeficiente de flujo n siempre es mayor a los 50°C a excepción a cuando ocurre a concentraciones altas de glicerina en la emulsión (de 70% a 90%).



Gráfica 4.8 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.sⁿ) Ley de la potencia vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.

Sin embargo, en el caso de Herschel – Bulkley expresado en la gráfica 4.9 el coeficiente de flujo n por lo general aumenta a medida que la temperatura en estudio es superior. También se aprecia que para temperaturas bajas y concentraciones de glicerina bajas (10% y 20%) en la emulsión el coeficiente de flujo es mayor que a temperaturas altas.

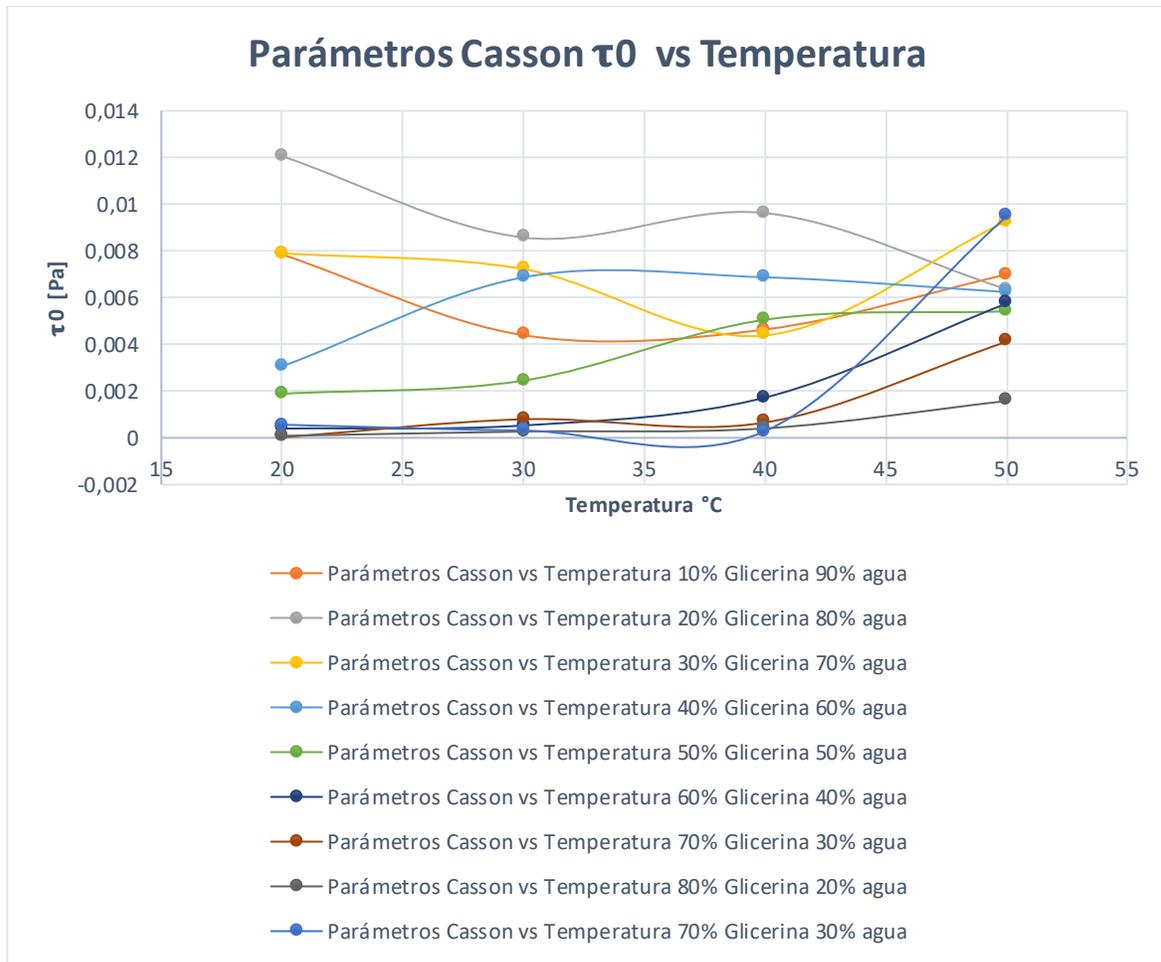


Gráfica 4.9 Reograma comparativo “Parámetro k (Pa.sⁿ) Herschel - Bulkley vs Temperatura”, Concentraciones de 10% a 90% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a diferentes temperaturas.

Los valores obtenidos mediante ley de Casson representan un comportamiento distinto al de ley de la potencia y Herschel Bulkley en altas concentraciones de glicerina, en la que no se observan cambios bruscos en el comportamiento de su curva, por lo que teniendo un coeficiente de flujo constante de $n=0,5$ podemos observar de mejor manera el comportamiento del coeficiente de consistencia k en función de las temperaturas, el cual solo es afectado cuando la emulsión tiene bajas concentraciones de glicerina y altas de agua destilada. Por lo que el coeficiente de consistencia k representa de qué manera cambia el comportamiento reológico de las emulsiones según la concentración en la que se encuentran.

A pesar de ello se observa mediante el estudio de los modelos de ley de potencia y Herschel Bulkley a temperatura constante, el índice de consistencia k disminuye a medida que disminuye la concentración de glicerina y aumenta la de agua destilada, como también aumenta a medida que la concentración de glicerina aumenta. Sin embargo, en los 3 modelos matemáticos es posible apreciar que, para cada concentración y temperatura, existe un rango en el cual el coeficiente de consistencia tiene una tendencia en la curva de valores.

Al evaluar los esfuerzos de corte en función de las temperaturas en el modelo de Casson, En la gráfica 4.65 y 4.10 se observa que el esfuerzo mínimo inicial aumenta en altas temperaturas para las concentraciones de 10% hasta un 50% de glicerina en la emulsión, sin embargo para emulsiones superiores al 50% el esfuerzo de corte mínimo tiende a variar, en los que para ciertos casos aumenta (concentración a 90% y 70% de glicerina en emulsión) y para otros casos va disminuyendo (concentraciones de 80% y 60% de glicerina en emulsión).



Gráfica 4.10 Reograma de Coeficiente de esfuerzo de corte mínimo τ_0 mediante Casson vs Temperatura

4.4 Comportamiento de la viscosidad aparente en función de las temperaturas.

El comportamiento de la viscosidad aparente se aprecia en los gráficos 4.66 hasta el 4.101 donde solo en los casos de la gráfica 4.93 los valores de la viscosidad dinámica fueron distintos a los de la viscosidad aparente, lo cual podría indicar errores en la lectura de dicha concentración a la temperatura de 50°C. Sin embargo, en todas las evaluaciones se obtuvieron coeficientes que permitían evaluar la viscosidad aparente con valores similares a los de la viscosidad dinámica. A su vez el comportamiento de la viscosidad aparente se ajusta a la recta obtenida de la viscosidad dinámica.

4.5 Análisis estadístico

Se aplicaron análisis estadístico para los valores de la viscosidad para cada una de las emulsiones, en función de su comportamiento de la curva como valor teórico de referencia para así considerar datos que fuesen relevantes para el estudio.

Tabla 4 Errores de Concentración (Glicerina/% agua) vs Viscosidad mPa-s.

%Concentración	T°C	SSE	RMSE	EME	Chi Cuadrado	G de L	Valor crítico	R^2
10	20	0,01317904	0,01148	0,00318889	1,76430458	4	9,48772904	0,99962062
	30	0,000576	0,0024	0,00066667	1,04039951	4	9,48772904	0,999971
	40	0,000484	0,0022	0,00052381	4,0542324	5	11,0704977	0,99998612
	50	0,00013924	0,00118	-0,00028095	3,08701053	5	11,0704977	0,99999959
20	20	0,700569	0,0837	0,0279	0,50698081	5	11,0704977	0,97706288
	30	1,7749E-30	1,3323E-16	-4,4409E-17	0,04739018	4	9,48772904	1
	40	0,01648656	0,01284	0,00356667	1,86958634	4	9,48772904	0,99968348
	50	0,00399424	0,00632	-0,00175556	2,16100057	4	9,48772904	0,99983364
30	20	0,00142884	0,00378	-0,0009	3,99883651	6	12,5915872	0,99998463
	30	0,004356	0,0066	0,00183333	2,22384685	5	11,0704977	0,99987942
	40	0,01032256	0,01016	-0,00282222	1,19697928	5	11,0704977	0,9995388
	50	0,01317904	0,01148	0,00382667	0,57773126	5	11,0704977	0,9994794
40	20	0,006084	0,0078	0,0013	8,32479021	9	16,9189776	0,99997612
	30	0,00034596	0,00186	-0,00044286	2,45459582	6	12,5915872	0,99999606
	40	0,00298116	0,00546	0,0013	2,45205563	6	12,5915872	0,99996436
	50	0,00037636	0,00194	-0,0004619	2,37661379	6	12,5915872	0,99999482
50	20	0,002704	0,0052	0,00086667	3,52327851	9	16,9189776	0,99999031
	30	0,010816	0,0104	0,00173333	10,2882404	9	16,9189776	0,99995469
	40	0,00906304	0,00952	-0,00198333	4,87516466	9	16,9189776	0,99994056
	50	0,001936	0,0044	-0,00104762	3,18654633	9	16,9189776	0,99999369
60	20	4E-06	0,0002	3,3333E-05	1,21552008	9	16,9189776	0,99999998
	30	0,012996	0,0114	-0,0019	6,08428434	9	16,9189776	0,99993952
	40	0,016384	0,0128	0,00213333	4,38244847	9	16,9189776	0,99995718
	50	0,67963536	0,08244	0,017175	4,90129469	9	16,9189776	0,99829275
70	20	0,0009	0,003	-0,0005	4,2192012	9	16,9189776	0,99999041
	30	0,007056	0,0084	0,00155556	1,21691595	9	16,9189776	0,99999566
	40	0,001444	0,0038	-0,00063333	8,28308378	9	16,9189776	0,99999529
	50	0,02377764	0,01542	0,00285556	9,05953321	9	16,9189776	0,99996487
80	20	0,0196	0,014	-0,00233333	8,37212446	9	16,9189776	0,999965
	30	0,0004	0,002	0,00033333	0,32700513	9	16,9189776	0,99999882
	40	0,0025	0,005	0,00083333	4,04029321	9	16,9189776	0,99999336
	50	0,007056	0,0084	0,0014	23,6175841	9	16,9189776	0,99999291
90	20	0,0001	0,001	0,00016667	5,59494476	9	16,9189776	0,99999999
	30	0,1156	0,034	-0,00566667	0,80458296	9	16,9189776	0,99993411
	40	0,0289	0,017	0,00283333	3,57857316	9	16,9189776	0,99996737
	50	7259,04	8,52	1,42	50,8821115	9	16,9189776	-2,74827181

Se observa que el valor crítico siempre es mayor que el valor de Chi Cuadrado, por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis planteada que indica que los valores de la viscosidad en función de la velocidad RPM, son independientes entre sí, esto quiere decir que dependiendo de la velocidad de estudio RPM es el valor de viscosidad que podemos obtener. En todos los casos, el valor del coeficiente de regresión R^2 fue cercano al 0,99 que indica que el 99% de los datos puede ser obtenido mediante la ecuación de la recta obtenida que representa los valores de viscosidad en función de la velocidad RPM y donde el margen de error de los datos obtenidos fue de $\pm 1\%$.

Los grados de libertad (G de L) fueron reduciéndose a medida que las concentraciones de glicerina disminuían, esto debido a que, al aumentar las concentraciones de agua destilada, el comportamiento de la viscosidad de la emulsión tiende a parecerse al agua, lo que provoca que el instrumento de medición no sea capaz de evaluarla a bajos RPM. Esto causa que la resistencia M% del husillo sea cercana a 0 por lo que, al no haber resistencias apreciables, no existe lectura.

CONCLUSIONES

Los valores obtenidos de la viscosidad son sensibles a los cambios de temperatura, por lo que la fuente termorreguladora es ideal para realizar estudios de concentraciones altas de glicerina en la emulsión, esto debido a que la glicerina tiende a cambiar su comportamiento con mayor facilidad frente a los cambios de temperatura a diferencia del agua que tiene un comportamiento newtoniano lo cual lo vuelve un fluido ideal para tener una referencia en la compresión del estudio de emulsiones. En la gráfica 4.13, 4.14 se aprecia que a medida que aumentamos los RPM el valor de la viscosidad obtenida tiende a aumentar, a diferencia de los estudios de las mismas muestras a temperatura de 20°C. Esto es debido a que, al aumentar la temperatura, la resistencia del fluido con el husillo en movimiento disminuye. Esto también se debe a que la temperatura de control a pesar de estar manipulada mediante termorregulador, esta fue aumentando en un rango de $\pm 1^\circ\text{C}$ lo cual varía levemente los datos de estudio, sobre todo para las emulsiones de concentraciones altas de glicerina. Esto se logra apreciar ya que a medida que disminuye el porcentaje de concentración de Glicerina en las emulsiones, el rango del valor de la viscosidad entre las velocidades de 10 RPM y 100 RPM tiende a disminuir.

A modo general, en todos los estudios de emulsión a diferentes concentraciones y en los 4 casos de temperaturas se observó que a medida que aumenta la velocidad de giro de husillo (RPM) el sesgo de error de los valores obtenidos para la viscosidad van disminuyendo, por lo tanto, esto indica la relación entre el % de resistencia que tiene el resorte para la lectura de husillo (%M) por lo que a bajas velocidades la resistencia al ser menor, tiende a ser menos exacta su lectura, lo mismo ocurre cuando el % de la resistencia del resorte es cercana a 100%, por lo que al llegar a dicha capacidad máxima, el reómetro se vuelve incapaz de realizar lecturas de viscosidad. Por lo que idealmente la selección de husillo para el estudio debe ir conforme al porcentaje de resistencia que tiene el resorte del husillo reflejado por pantalla (%M) en las que si el fluido estudiado tiene demasiada resistencia y un %M cercano a 100% lo mejor sería cambiar de husillo y utilizar uno con una sección de área de contacto inferior a la empleada como por ejemplo un husillo Sp-3 o incluso SP-4. Sin embargo, cuando el %M es cercano a 0 se debe cambiar el husillo por uno con mayor sección de área, como el SP-1 y SP-2.

A partir de la gráfica 4.36 hasta la 4.48 se aprecia que las lecturas a bajos RPM marcan una viscosidad de 0, esto es debido a que la emulsión al estar más diluida en el agua destilada, tiende a

tener menor resistencia al husillo y en consecuencia menor porcentaje de resistencia (%M) para la lectura del reómetro, por lo que, si él % es cercano a 0, el reómetro se vuelve incapaz de realizar lecturas, a su vez, para resistencias muy pequeñas el sesgo de error aumenta. Para los casos en que no se desee cambiar el husillo, lo mejor sería cambiar los rangos de velocidad de estudio, ya que, a menor velocidad, menor es la resistencia que opone el fluido lo cual se vuelve ideal para estudios con husillos de sección amplia como lo es el SP-1 y para una mayor velocidad podría aplicarse un husillo de sección menor como lo es el SP-2 o SP-3.

Esto se demuestra en los reogramas comparativos de esfuerzo de corte y velocidad de corte (gráficas 4.54 a la 4.62) se aprecia que a medida que aumenta la velocidad de corte el esfuerzo de corte siempre aumenta, esto es debido a que para aumentar la velocidad de corte, esta depende de la velocidad de giro de husillo, por lo que a velocidades altas la resistencia que el fluido realiza contra el husillo siempre es mayor que para velocidades bajas, entre más baja sea la velocidad, menor resistencia opone el fluido a la sección de contacto con el husillo.

Considerando el comportamiento de la viscosidad en función de la velocidad de giro de husillo RPM representados en las gráficas 4.8 – 4.37, se observa que el margen de error va disminuyendo a medida que aumenta la velocidad de giro del husillo, esto es debido a que a velocidades bajas el porcentaje de resistencia de husillo M% tiende a ser cercano a 0 lo cual dificulta la lectura del reómetro y el rango de 10 RPM a 100 RPM con rangos de temperaturas de 20, 30, 40 y 50 °C no completa el esfuerzo máximo de resistencia que puede soportar el husillo (%M 100), a medida que él %M es cercano a 100% el error de lectura debería ir aumentando, por lo que nuestro caso no se logra apreciar mayormente este comportamiento debido exclusivamente al rango de velocidades en estudio.

Mediante la Ley de la potencia se observa que para concentraciones altas de glicerina (mayores al 60%) el coeficiente de consistencia k aumenta a medida que aumenta la temperatura aplicada, sin embargo, para concentraciones bajas de glicerina (menores al 10%) el coeficiente de consistencia k disminuye, actuando de manera contraria que para el caso de altas concentraciones de glicerina. Esto es debido a que la capacidad calorífica de la glicerina es mayor a la del agua, por lo que la glicerina es más propensa a ceder o ganar energía térmica, la cual es afectada cuando se aplican esfuerzos en el fluido, ya que debido a las

propiedades pseudoplástico de la glicerina, su deformación libera energía haciendo que la composición física de la glicerina no vuelva a su estado inicial. Esto también es la razón por la cual emulsiones de alta concentración de agua (sobre el 80% de agua destilada) tenga amplios rangos de diferencia en el coeficiente de consistencia dependiente de la temperatura.

Los valores obtenidos mediante ley de la potencia y Herschel Bulkley son similares, por lo tanto, podemos decir que el esfuerzo cortante mínimo que genera el husillo es muy bajo en relación con el volumen del fluido en estudio, esto debido a que no afecta mayormente la relación entre el esfuerzo de corte y velocidad de corte del husillo con el fluido. Considerando que el esfuerzo de corte mínimo fue obtenido mediante las constantes geométricas del husillo, sus dimensiones no afectan en mayor medida el aumento de error en la obtención de datos, lo cual se demuestra en el coeficiente de regresión R^2 para los datos de viscosidad de la tabla 5.

En las gráficas 4.38 – 4.42 se observa que a medida que aumenta la temperatura el rango de los valores que tienen las viscosidades en todas las emulsiones disminuyen, algo similar ocurre con los rangos de las gráficas 4.43 – 4.48 que describen la relación del esfuerzo de corte y velocidad de corte a diferentes temperaturas y concentración constante, en las que a medida que aumenta su temperatura, el rango del esfuerzo de corte disminuye, volviendo la curva de comportamiento menos pronunciada que a bajas temperaturas, por lo tanto, esto indica que a medida que baja la temperatura, el coeficiente de consistencia k y volviendo así más viscosa la emulsión.

REFERENCIAS

7Graus. (2017). *Viscosidad*. Significados.Com. <https://www.significados.com/viscosidad/>

Ashitey, E. (2016). *Ghana: Food and Agricultural Import Regulations and Standards - Narrative: FAIRS Country Report*. 16.

Barnes, H. A. (2000). A Handbook of Elementary Rheology. In Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics (Ed.), *Polymer Composites* (1°, Vol. 6, Issue 4). University of Wales.

Bórquez, R., & Rojas, E. (2019). *Laboratorio n ° 1 : Reología de alimentos*. 1–51.

Burgos Robles, S. N., & Rivera Shyan, M. C. (2018). *Propiedades reológicas de pulpa de sanky (Corryocactus brevistylus) y aguaymanto (Physalis peruviana L.)*. 124.

Cañadas, R. (n.d.). *Que es el error medio cuadrático RMSE y MSE*.

<https://www.abdatum.com/machine-learning/rmse>

cienciadehoy. (2021). *Cómo calcular el error absoluto medio*. <https://cienciadehoy.com/como-calcular-el-error-absoluto-medio/>

Cruz Fernando. (2015). *Algunos Métodos de Estimación para Viscosidad*. 6.

<http://tecno.cruzfierro.com/formularios/viscosidad>

DARLINGTON ENGINEERING. (2021). *DARLINGTON ENGINEERING*. BLOG.

<http://www.adareng.com/es/articulo/trasvase-de-fluidos-no-newtonianos/n-4>

Delugo, L., Cabrera, C. A., & Provasi, P. F. (2021). Flujo viscoso: diseño y construcción de un dispositivo para determinar el coeficiente de viscosidad dinámica del agua.

Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica, 7, 108.

<https://doi.org/10.30972/eitt.704769>

Department of Meteorology. (2018). *Calculate density and viscosity of glycerol/water mixtures*. University of Reading.

http://www.met.reading.ac.uk/~sws04cdw/viscosity_calc.html

Devore, J. (2008). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. In *Cengage Learning: Vol. 7th Ed.* (0 ed.). Cengage Learning.

Drubey, Y. D. (2008). *Propiedades Reológicas De Emulsiones De Petróleo Pesado En Agua Reological Properties of Emulsions of Petroleum Weighed in Water*. 16, 244–249.

Finnemore, J. B. F. E. J. (1999). Mecanica de fluidos con aplicaciones de ingeniería. *Mc Graw Hill*, 9°, 519.

Referencias

- García, M. L., & Martínez, P. (2000). *Cálculo de errores. Error absoluto y relativo*.
https://www.educamix.com/educacion/3_eso_materiales/b_i/conceptos/conceptos_bloque_1_3.htm
- Gomez. (1997). *Norma Estándar de colores en Sistemas de Tuberías*. 27.
- Guanoluisa, A. N. P. (2013). *DE SÓLIDOS SOLUBLES MEDIANTE EL USO DEL EQUIPO UNIVERSAL TA – XT2i*. 264.
https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/6561/1/AL_506.pdf
- ISO Viscosity Grades. (2001). *de Viscosidad ISO*.
https://www.swissoil.com.ec/boletines/SO_Boletin05_viscosidad ISO.pdf
- ligdigonzalez. (n.d.). *Error cuadrático medio (RMSE)*. 2022. <https://aprendeia.com/evaluando-el-error-en-los-modelos-de-regresion/>
- Luis Benites. (2021). *Error absoluto y error absoluto medio*. Statologos.Com.
<https://statologos.com/error-absoluto/>
- Martinez, W. (2015). *Reologia de fluidos alimentarios*. 39(2), 261–270.
http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/Clase_1___REOL%D3GICA_DE_FLUIDOS.pdf
- Mexpolímeros. (2014). *Mexpolímeros*. Laboratorio > Análisis Físicas > H-Z > Viscosidad.
<https://www.mexpolimeros.com/viscosidad aparente.html>
- Mullineux, G. (2008). Non-linear least squares fitting of coefficients in the Herschel-Bulkley model. *Applied Mathematical Modelling*, 32(12), 2538–2551.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.09.010>
- Newtoniano, F., & Newtoniano, F. N. O. (n.d.). *FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS SCRIBD*.
- Oracle Corporation. (n.d.). *RMSE (Error cuadrático medio)*.
https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_RMSE.htm#PFUSU-GUID-FD9381A1-81E1-4F6D-8EC4-82A6CE2A6E74
- Pérez-Trejo, L., Méndez Sánchez, A., & Paniagua Mercado, A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 237–245.
- PUC-Rio. (2015). *Introdução aos reômetros e reometria rotacional Sumário*. 1º.
- Rehm, B., Haghshenas, A., & Limits, D. (2012). *Bingham Plastic Model Flow Drilling* :

Referencias

- Underbalance Drilling with Liquid Single-Phase Systems General Theory and Physical Model Formulation.*
- Reid, R. C., Sherwood, T. K., & Street, R. E. (1959). The Properties of Gases and Liquids. In *Physics Today* (Vol. 12, Issue 4, pp. 38–40).
<https://doi.org/10.1063/1.3060771>
- Roldán, S. G. (2009). Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA*, 1°.
- Sánchez, G., Vial, C., & Moraga, N. (2002). Estudio De Fluidos No Newtonianos Con Los Métodos De Volúmenes Y Elementos Finitos. *Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá*, 10, 23–34. <https://doi.org/10.4067/s0718-13372002001000004>
- SÁNCHEZ, L. (2016). *Clasificación De Los Fluidos No Newtonianos*. 1–9. *Technical Information for Keithley*. (n.d.). mm.
<https://www.manualslib.com/manual/748234/Keithley-6514>
- TPI. (2021). *TPI PIPPING*. 6. <https://www.tpi.cl/alimentos/piping/>
- Vajravelu, K., Sreenadh, S., Devaki, P., & Prasad, K. V. (2011). Mathematical model for a Herschel-Bulkley fluid flow in an elastic tube. *Central European Journal of Physics*, 9(5), 1357–1365. <https://doi.org/10.2478/s11534-011-0034-3>
- Wagner, M., Reiche, K., Blume, A., & Garidel, P. (2012). *Viscosity measurements of antibody solutions by photon correlation spectroscopy : an indirect approach – limitations and applicability for high-concentration liquid protein solutions*. January.
<https://doi.org/10.3109/10837450.2011.649851>
- 7Graus. (2017). *Viscosidad*. Significados.Com. <https://www.significados.com/viscosidad/>
- Ashitey, E. (2016). *Ghana: Food and Agricultural Import Regulations and Standards - Narrative: FAIRS Country Report*. 16.
- Barnes, H. A. (2000). A Handbook of Elementary Rheology. In Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics (Ed.), *Polymer Composites* (1°, Vol. 6, Issue 4). University of Wales.
- Bórquez, R., & Rojas, E. (2019). *Laboratorio n° 1 : Reología de alimentos*. 1–51.
- Burgos Robles, S. N., & Rivera Shyan, M. C. (2018). *Propiedades reológicas de pulpa de sanky (Corryocactus brevistylus) y aguaymanto (Physalis peruviana L.)*. 124.
- Cañadas, R. (n.d.). *Que es el error medio cuadrático RMSE y MSE*.
<https://www.abdatum.com/machine-learning/rmse>

Referencias

- cienciadehoy. (2021). *Cómo calcular el error absoluto medio*. <https://cienciadehoy.com/como-calcular-el-error-absoluto-medio/>
- Cruz Fernando. (2015). *Algunos Métodos de Estimación para Viscosidad*. 6. <http://tecno.cruzfierro.com/formularios/viscosidad>
- DARLINGTON ENGINEERING. (2021). *DARLINGTON ENGINEERING*. BLOG. <http://www.adareng.com/es/articulo/trasvase-de-fluidos-no-newtonianos/n-4>
- Delugo, L., Cabrera, C. A., & Provasi, P. F. (2021). Flujo viscoso: diseño y construcción de un dispositivo para determinar el coeficiente de viscosidad dinámica del agua. *Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica*, 7, 108. <https://doi.org/10.30972/eitt.704769>
- Department of Meteorology. (2018). *Calculate density and viscosity of glycerol/water mixtures*. University of Reading. http://www.met.reading.ac.uk/~sws04cdw/viscosity_calc.html
- Devore, J. (2008). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. In *Cengage Learning: Vol. 7th Ed.* (0 ed.). Cengage Learning.
- Drubey, Y. D. (2008). *Propiedades Reológicas De Emulsiones De Petróleo Pesado En Agua* *Reological Properties of Emulsions of Petroleum Weighed in Water*. 16, 244–249.
- Finnemore, J. B. F. E. J. (1999). Mecánica de fluidos con aplicaciones de ingeniería. *Mc Graw Hill*, 9°, 519.
- García, M. L., & Martínez, P. (2000). *Cálculo de errores. Error absoluto y relativo*. https://www.educamix.com/educacion/3_eso_materiales/b_i/conceptos/conceptos_bloque_1_3.htm
- Gomez. (1997). *Norma Estándar de colores en Sistemas de Tuberías*. 27.
- Guanoluisa, A. N. P. (2013). *DE SÓLIDOS SOLUBLES MEDIANTE EL USO DEL EQUIPO UNIVERSAL TA – XT2i*. 264. https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/6561/1/AL_506.pdf
- ISO Viscosity Grades. (2001). *de Viscosidad ISO*. https://www.swissoil.com.ec/boletines/SO_Boletin05_viscosidad ISO.pdf
- ligdigonzalez. (n.d.). *Error cuadrático medio (RMSE)*. 2022. <https://aprendeia.com/evaluando-el-error-en-los-modelos-de-regresion/>
- Luis Benites. (2021). *Error absoluto y error absoluto medio*. Statologos.Com.

Referencias

- <https://statologos.com/error-absoluto/>
- Martinez, W. (2015). *Reologia de fluidos alimentarios*. 39(2), 261–270.
http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/Clase_1___REOL%D3GICA_DE_FLUIDOS.pdf
- Mexpolímeros. (2014). *Mexpolímeros*. Laboratorio > Análisis Físicas > H-Z > Viscosidad.
[https://www.mexpolimeros.com/viscosidad aparente.html](https://www.mexpolimeros.com/viscosidad%20aparente.html)
- Mullineux, G. (2008). Non-linear least squares fitting of coefficients in the Herschel-Bulkley model. *Applied Mathematical Modelling*, 32(12), 2538–2551.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2007.09.010>
- Newtoniano, F., & Newtoniano, F. N. O. (n.d.). *FLUIDOS NEWTONIANOS Y NO NEWTONIANOS SCRIBD*.
- Oracle Corporation. (n.d.). *RMSE (Error cuadrático medio)*.
https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_RMSE.htm#PFUSU-GUID-FD9381A1-81E1-4F6D-8EC4-82A6CE2A6E74
- Pérez-Trejo, L., Méndez Sánchez, A., & Paniagua Mercado, A. (2010). Determinación de la viscosidad de fluidos newtonianos y no newtonianos (una revisión del viscosímetro de Couette). *Latin-American Journal of Physics Education*, 4(1), 237–245.
- PUC-Rio. (2015). *Introdução aos reômetros e reometria rotacional Sumário*. 1°.
- Rehm, B., Haghshenas, A., & Limits, D. (2012). *Bingham Plastic Model Flow Drilling : Underbalance Drilling with Liquid Single-Phase Systems General Theory and Physical Model Formulation*.
- Reid, R. C., Sherwood, T. K., & Street, R. E. (1959). The Properties of Gases and Liquids . In *Physics Today* (Vol. 12, Issue 4, pp. 38–40).
<https://doi.org/10.1063/1.3060771>
- Roldán, S. G. (2009). Diseño mecánico de un equipo para medida de la viscosidad en fluidos no newtonianos. *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA*, 1°.
- Sánchez, G., Vial, C., & Moraga, N. (2002). Estudio De Fluidos No Newtonianos Con Los Métodos De Volúmenes Y Elementos Finitos. *Revista Facultad de Ingeniería - Universidad de Tarapacá*, 10, 23–34. <https://doi.org/10.4067/s0718-13372002001000004>
- SÁNCHEZ, L. (2016). *Clasificación De Los Fluidos No Newtonianos*. 1–9.
Technical Information for Keithley. (n.d.). mm.

Referencias

- <https://www.manualslib.com/manual/748234/Keithley-6514>
- TPI. (2021). *TPI PIPING*. 6. <https://www.tpi.cl/alimentos/piping/>
- Vajravelu, K., Sreenadh, S., Devaki, P., & Prasad, K. V. (2011). Mathematical model for a Herschel-Bulkley fluid flow in an elastic tube. *Central European Journal of Physics*, 9(5), 1357–1365. <https://doi.org/10.2478/s11534-011-0034-3>
- Wagner, M., Reiche, K., Blume, A., & Garidel, P. (2012). *Viscosity measurements of antibody solutions by photon correlation spectroscopy : an indirect approach – limitations and applicability for high-concentration liquid protein solutions*. January. <https://doi.org/10.3109/10837450.2011.649851>

ANEXO 1: IMÁGENES



Figura Anexo 4.1 Reómetro ROTAVISC LO VI



Figura Anexo 4.2 Husillos para Reómetro ROTAVISC LO VI.

Anexos

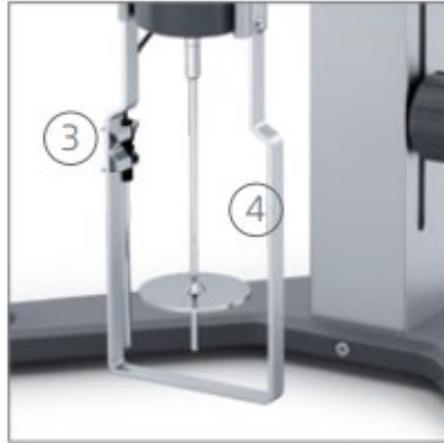


Figura Anexo 4.3 Soporte para Termómetro y Protección del husillo.



Figura Anexo 4.4 Reómetro ROTAVISC LO VI instalado en la fuente termorreguladora y muestra de 200 ml de Glicerina



Figura Anexo 4.5 Reómetro ROTAVISC LO VI instalado en la fuente termorreguladora con una temperatura inicial de 25° C



Figura Anexo 4.6 Configuración de Unidades para el análisis mediante Reómetro ROTAVISC LO VI.



Figura Anexo 4.7 Valores de viscosidad obtenidos por pantalla mediante análisis a los 33 segundos y con una velocidad de giro de husillo de 50 RPM.



Figura Anexo 4.8 Gráfica de Viscosidad vs Velocidad de giro de husillo en RPM obtenida por pantalla.

Anexos

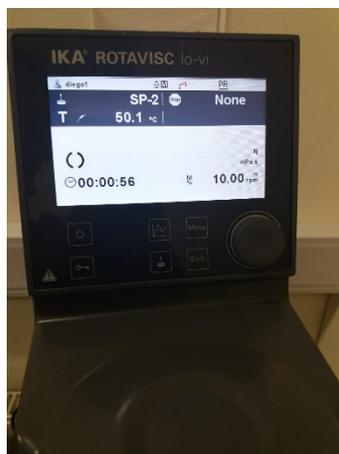


Figura Anexo 4.9 Análisis de Viscosidad vs Velocidad de giro de husillo en RPM obtenida por pantalla. Temperatura 50°C y Concentración del 100% Glicerina

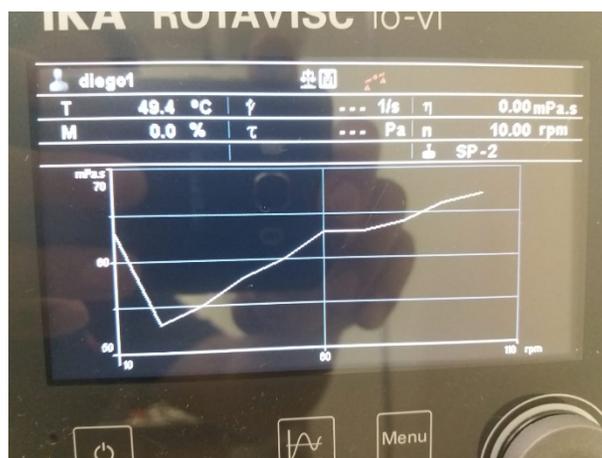
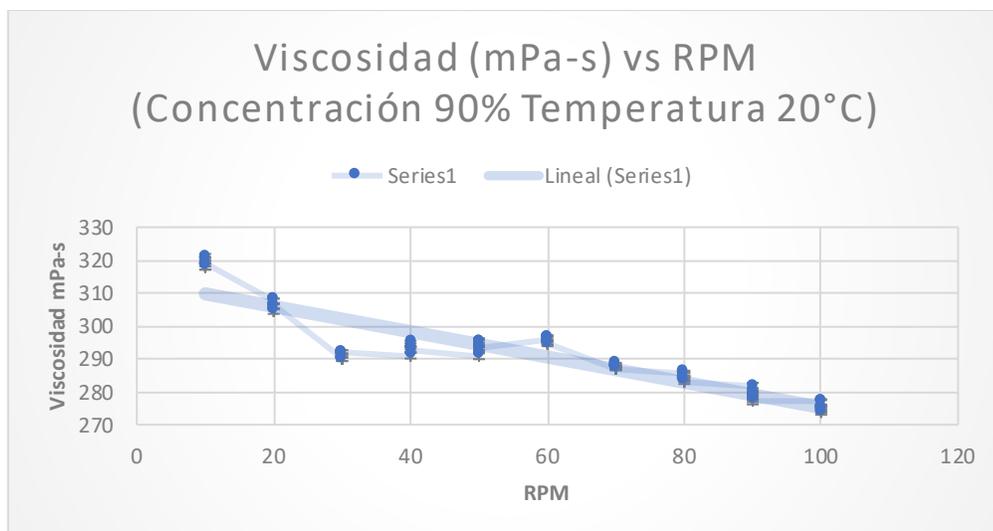
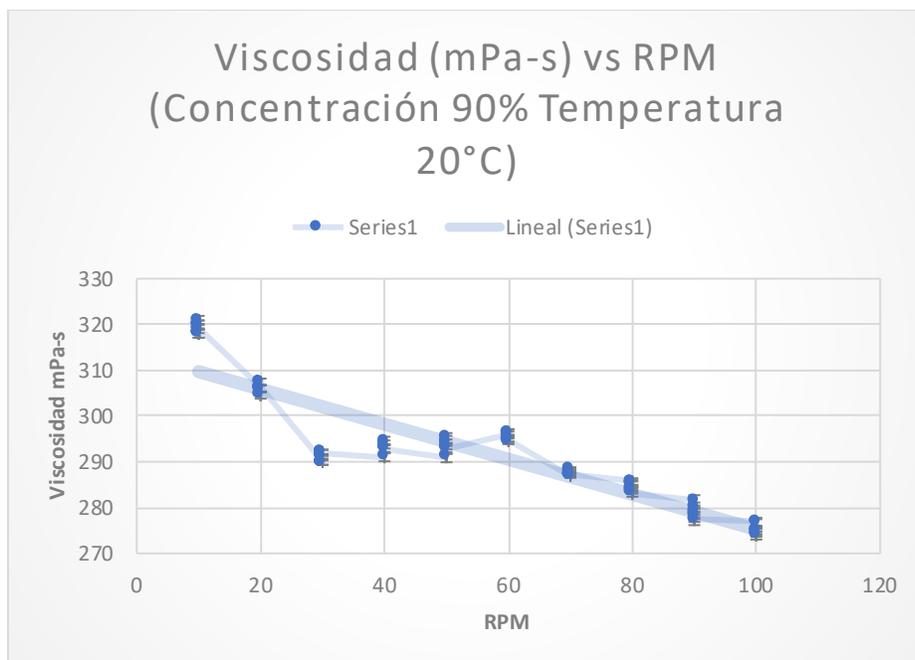


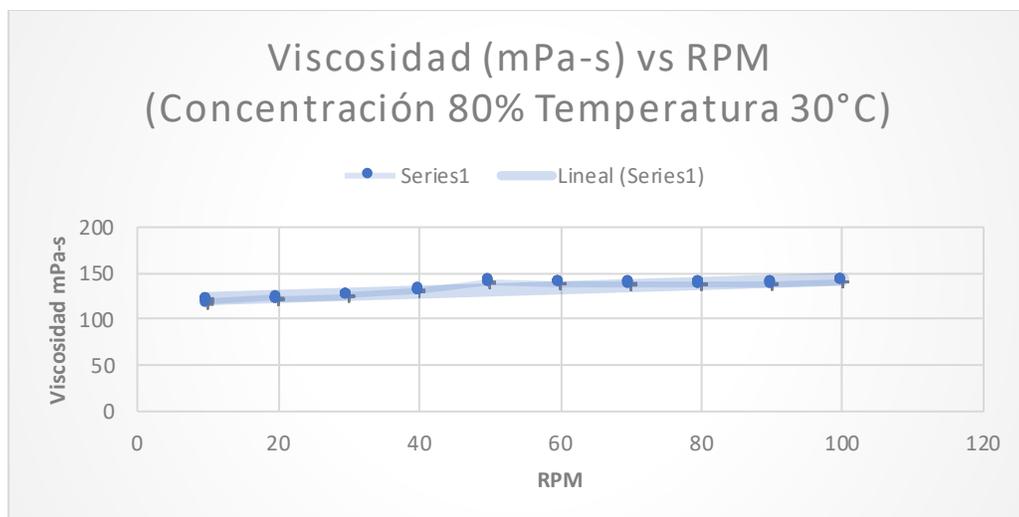
Figura Anexo 4.10 Gráfica de Viscosidad vs Velocidad de giro de husillo en RPM obtenida por pantalla. Temperatura 50°C y Concentración del 100% Glicerina



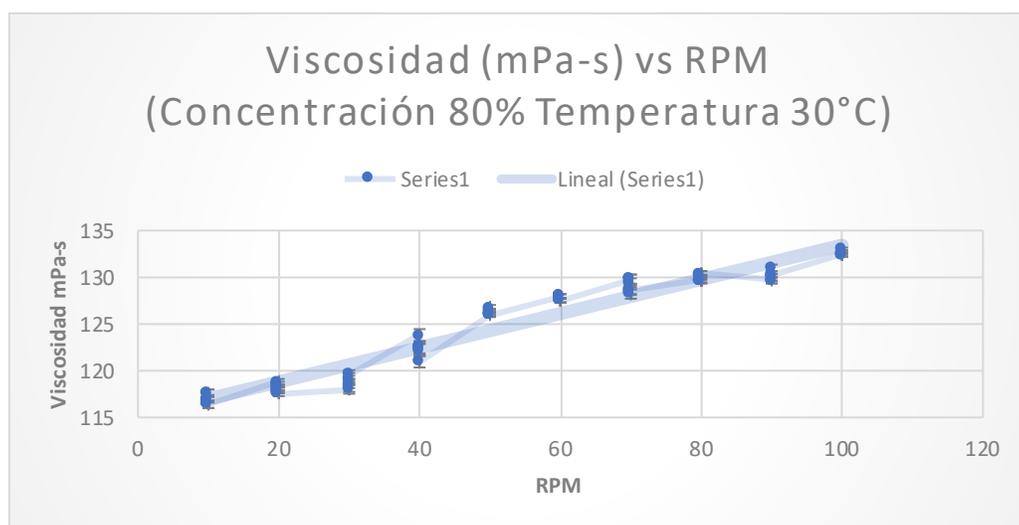
Gráfica 4.11 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



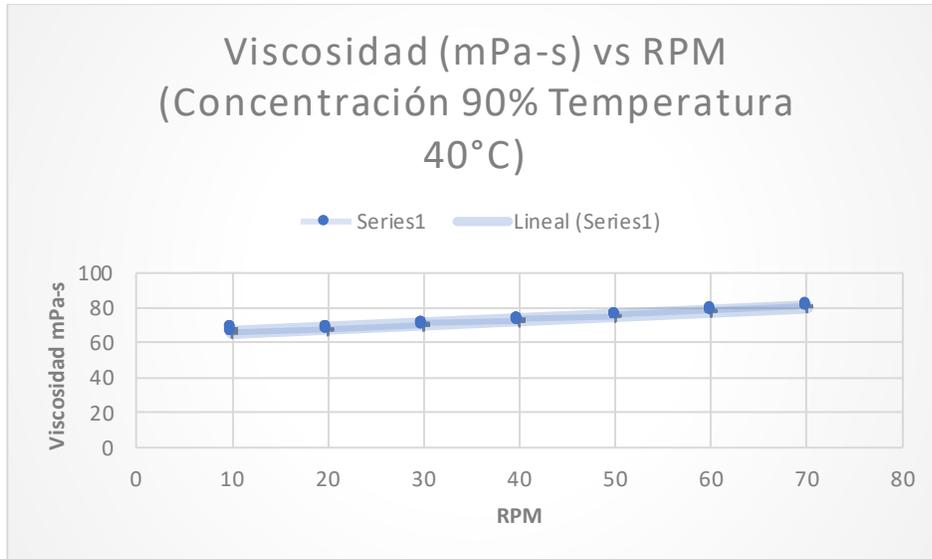
Gráfica 4.12 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado)



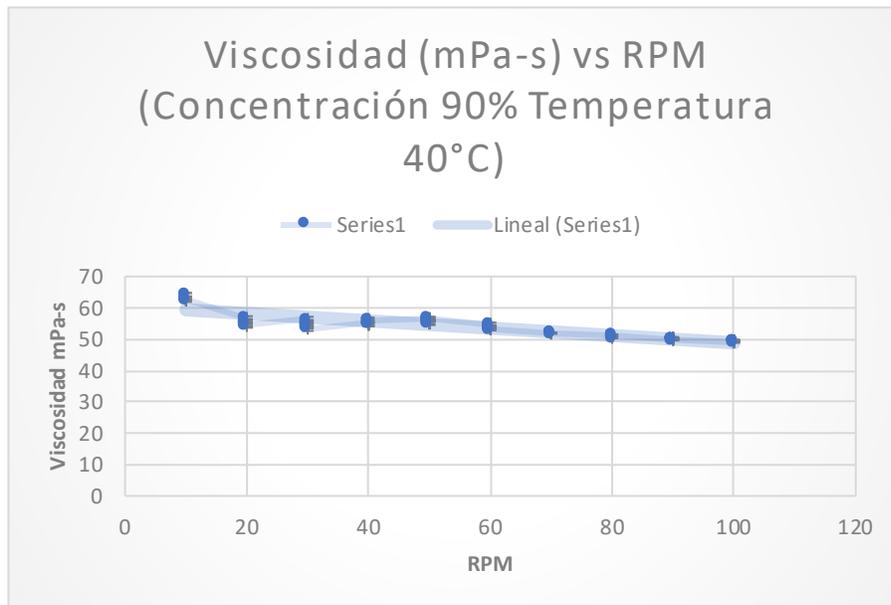
Gráfica 4.13 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



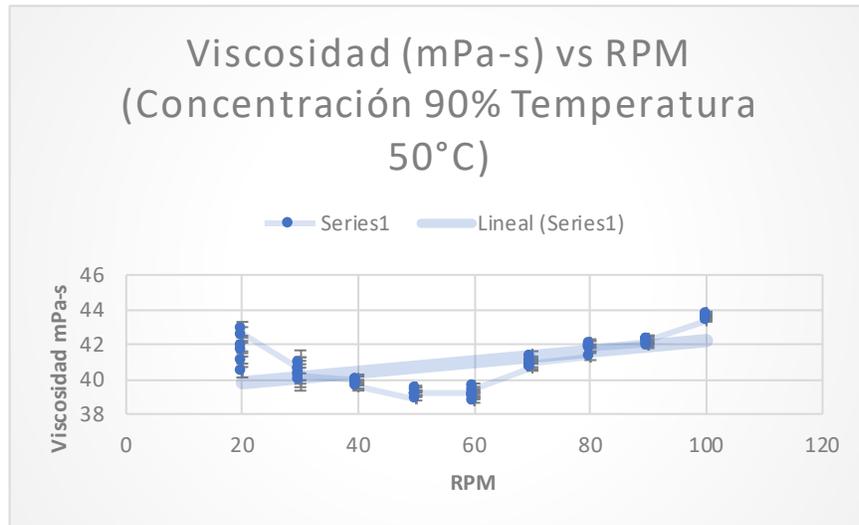
Gráfica 4.14 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado)



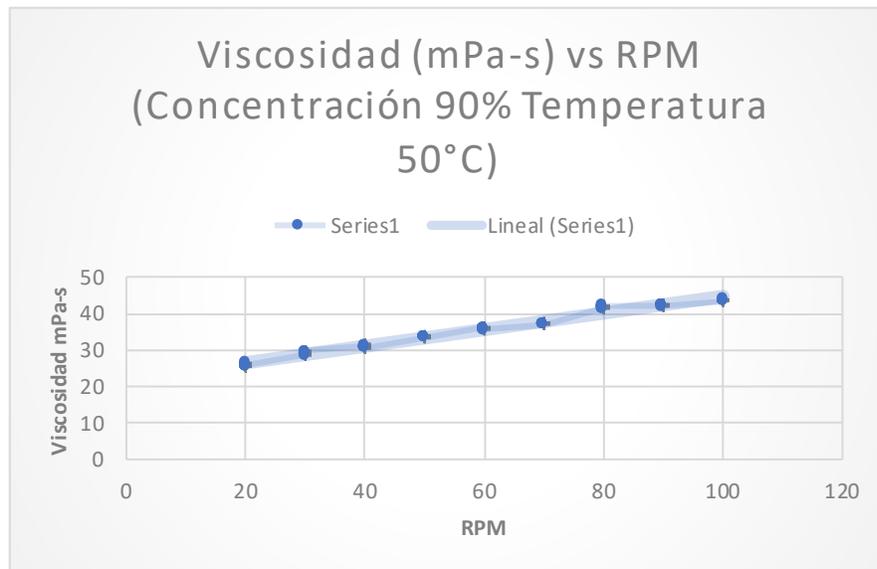
Gráfica 4.15 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90% de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



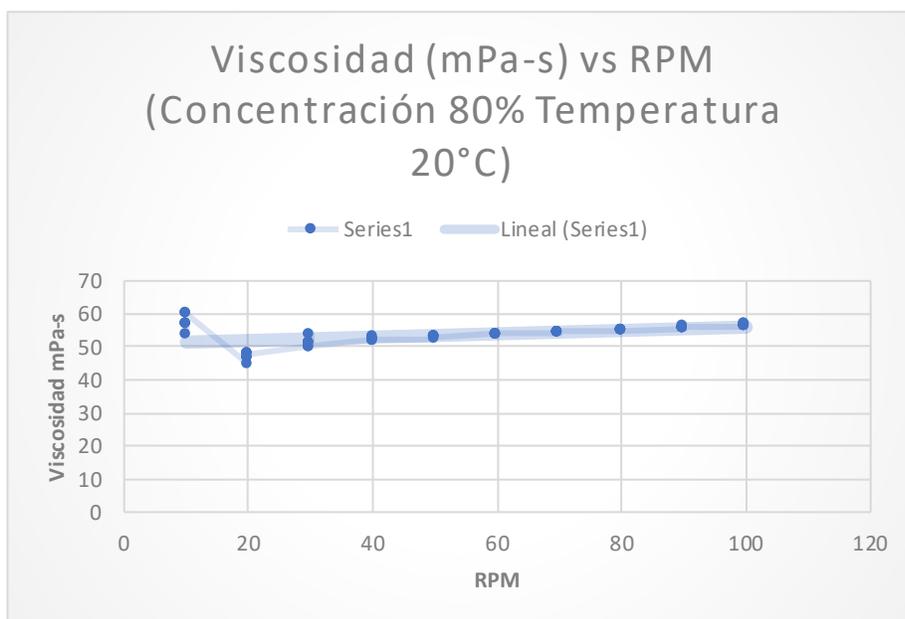
Gráfica 4.16 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90% de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado)



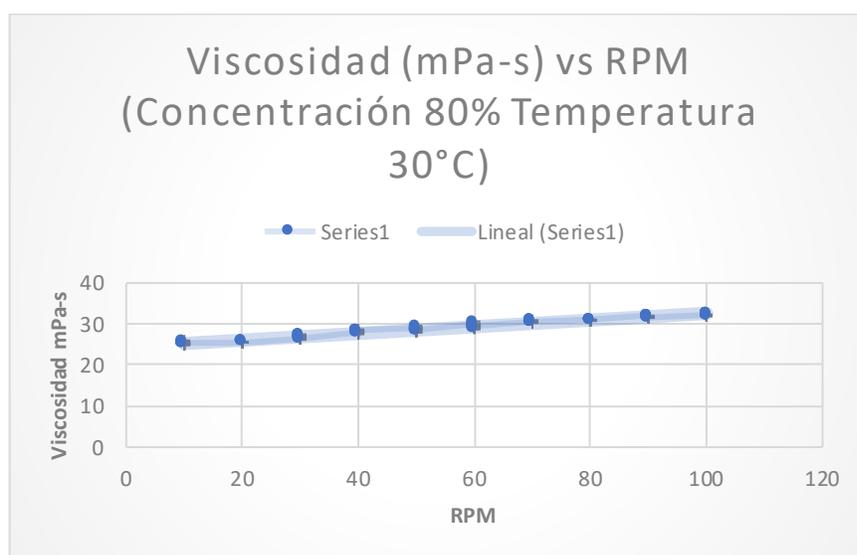
Gráfica 4.17 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



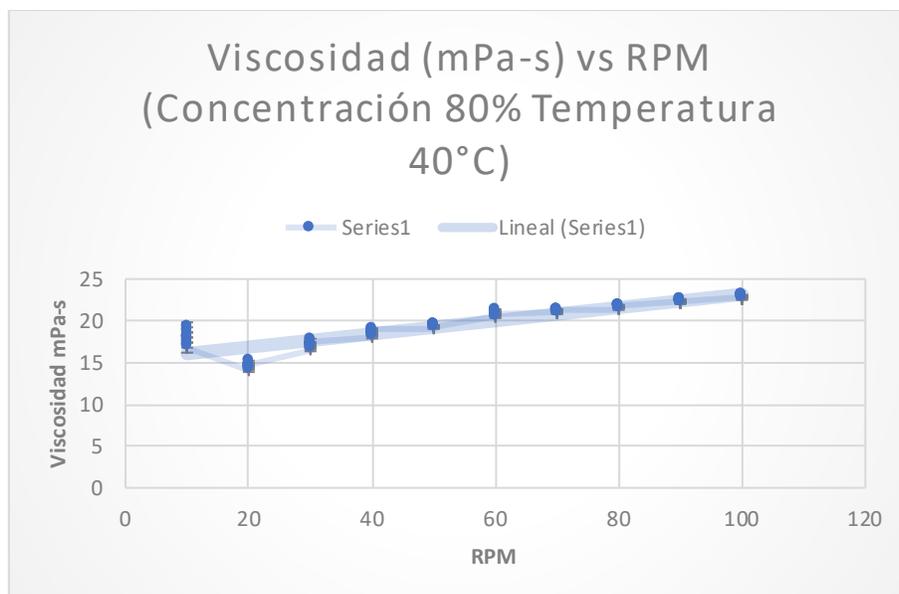
Gráfica 4.18 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (90 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo. (Ajustado)



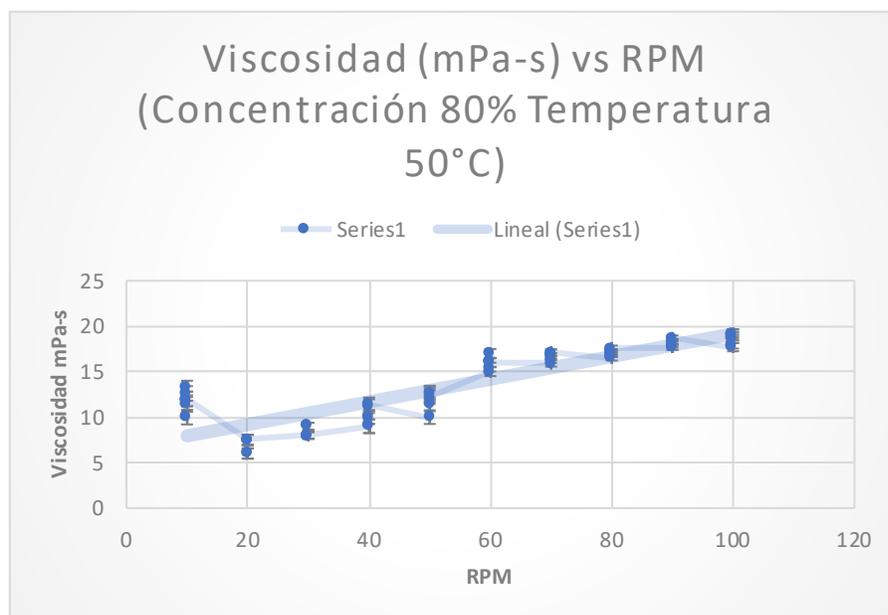
Gráfica 4.19 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80% de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.20 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80% de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



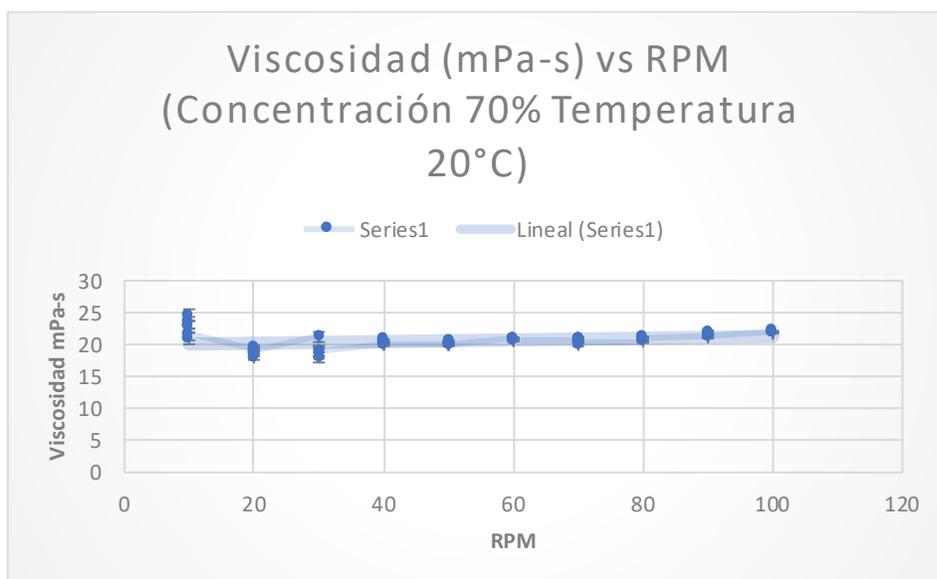
Gráfica 4.21 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



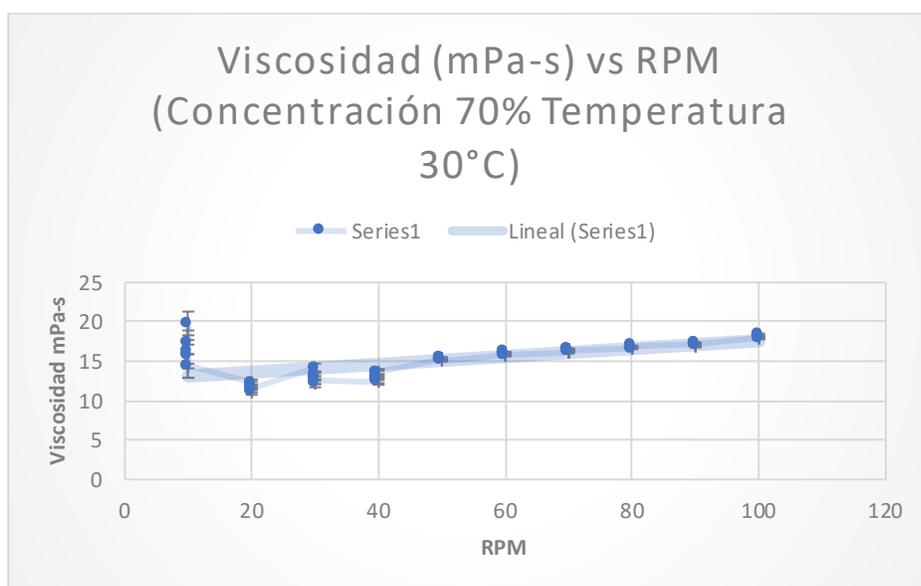
Gráfica 4.22 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

Anexos

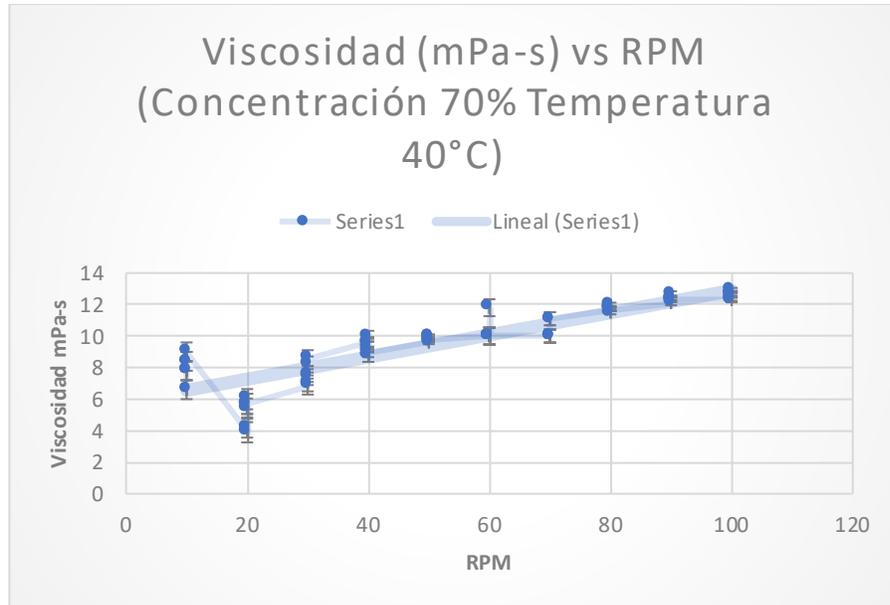
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada)



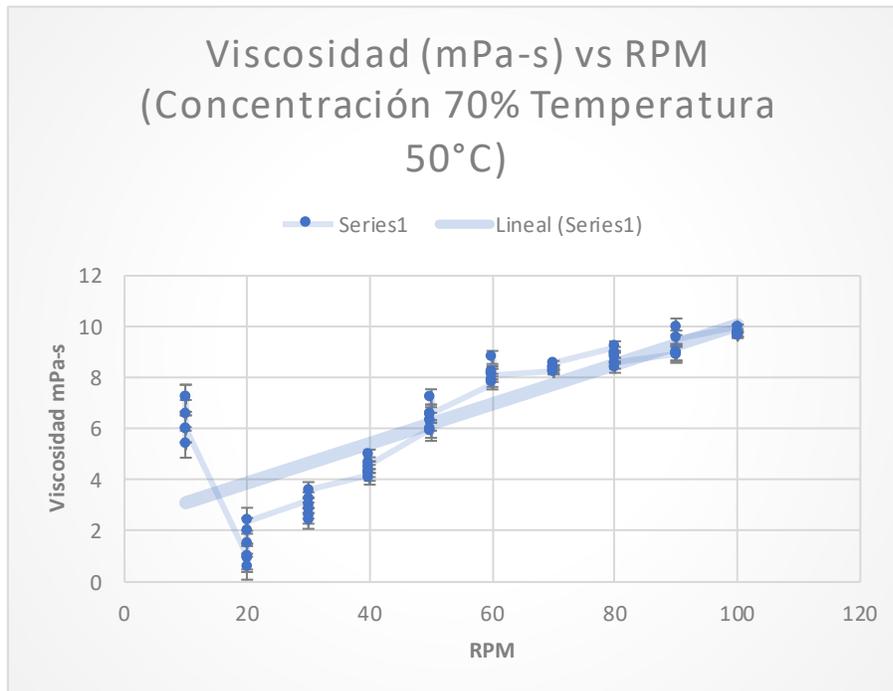
Gráfica 4.23 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.24 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



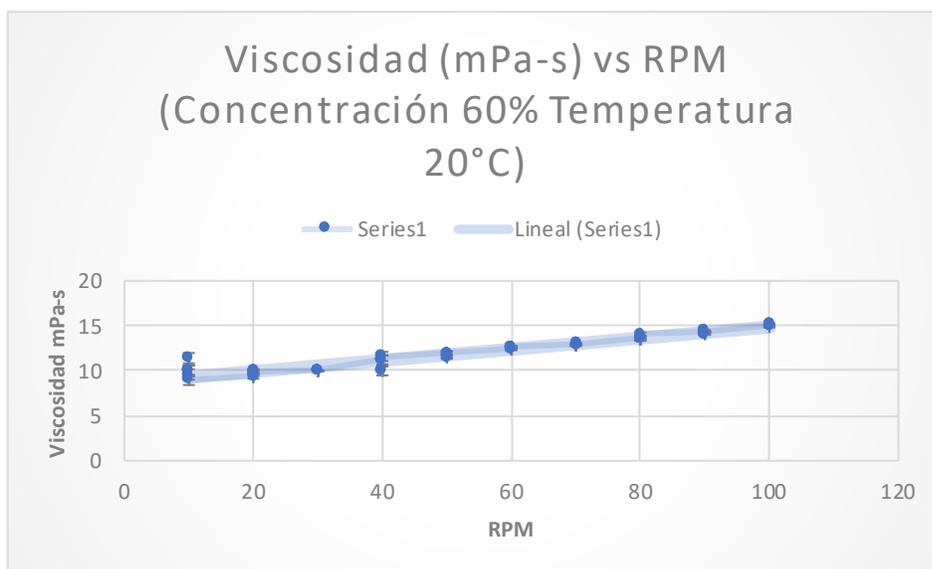
Gráfica 4.25 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70% de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 muestras para cada intervalo.



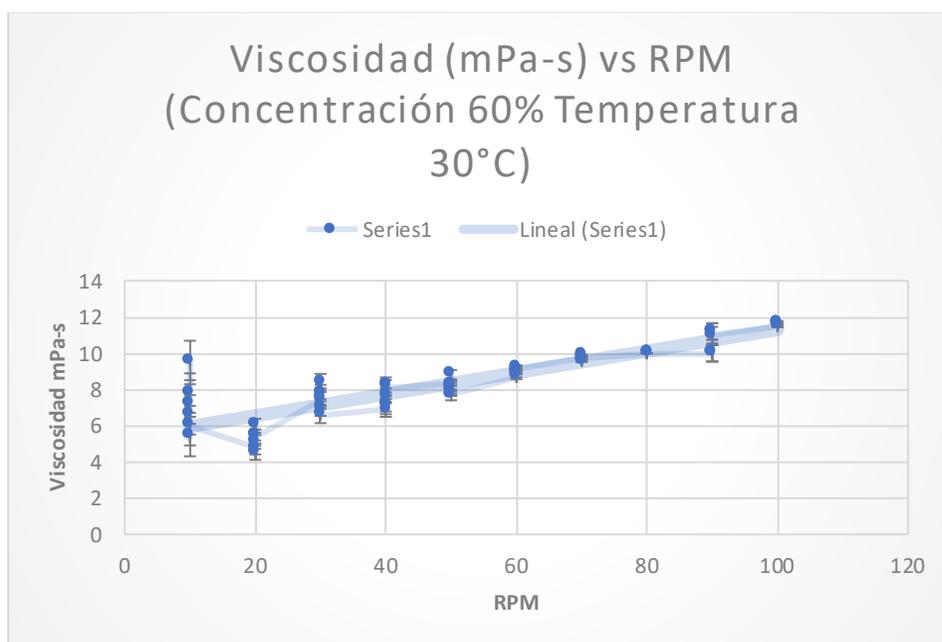
Gráfica 4.26 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (70% de Glicerina y 30% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

Anexos

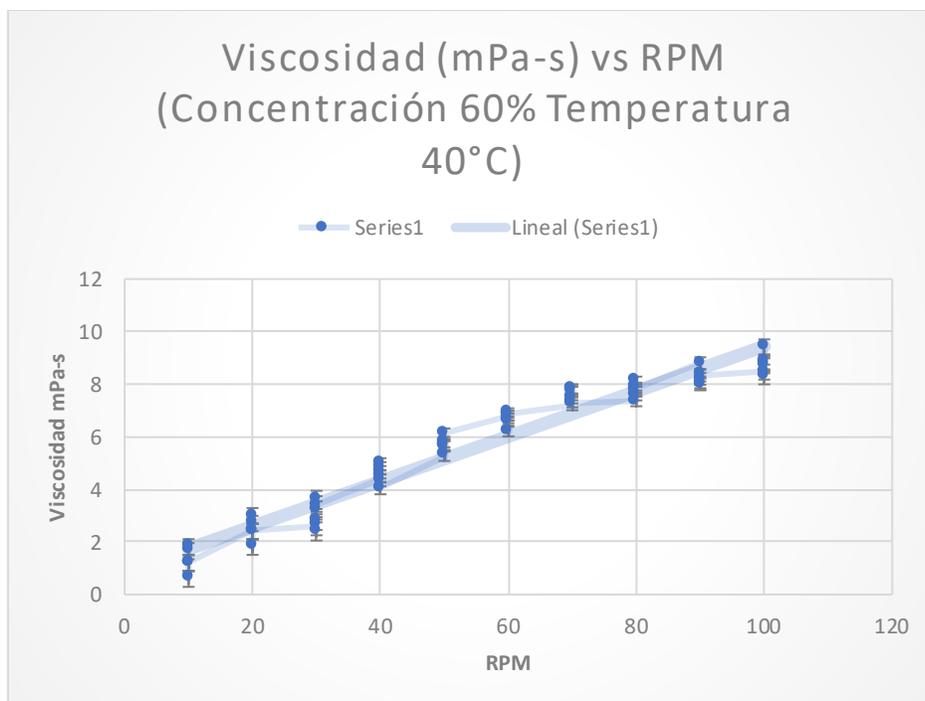
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada)



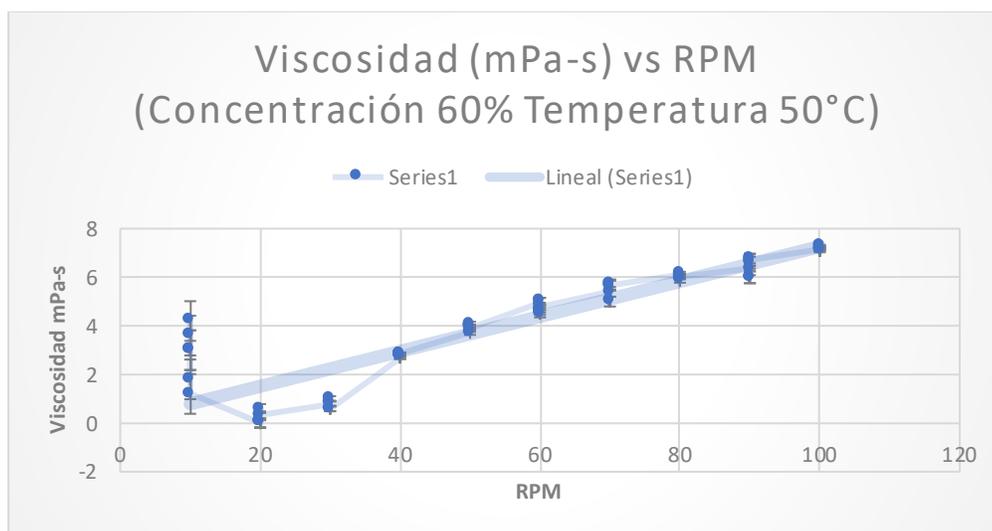
Gráfica 4.27 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.28 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

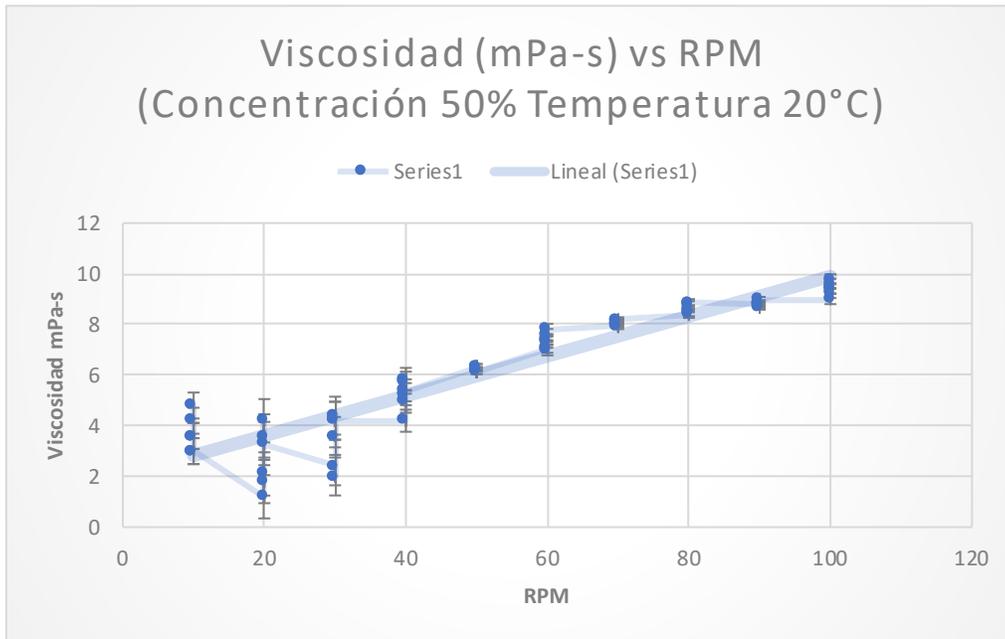


Gráfica 4.29 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

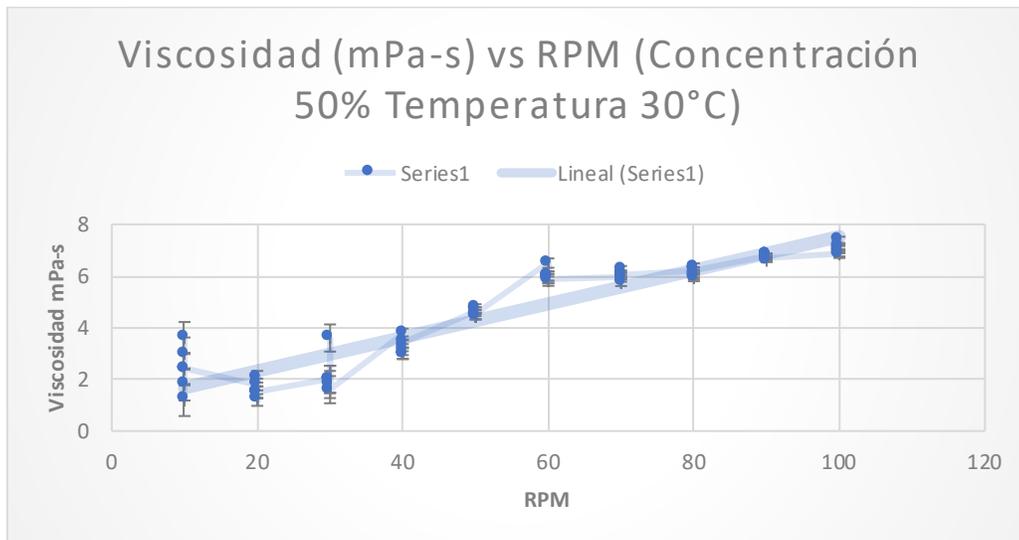


Gráfica 4.30 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

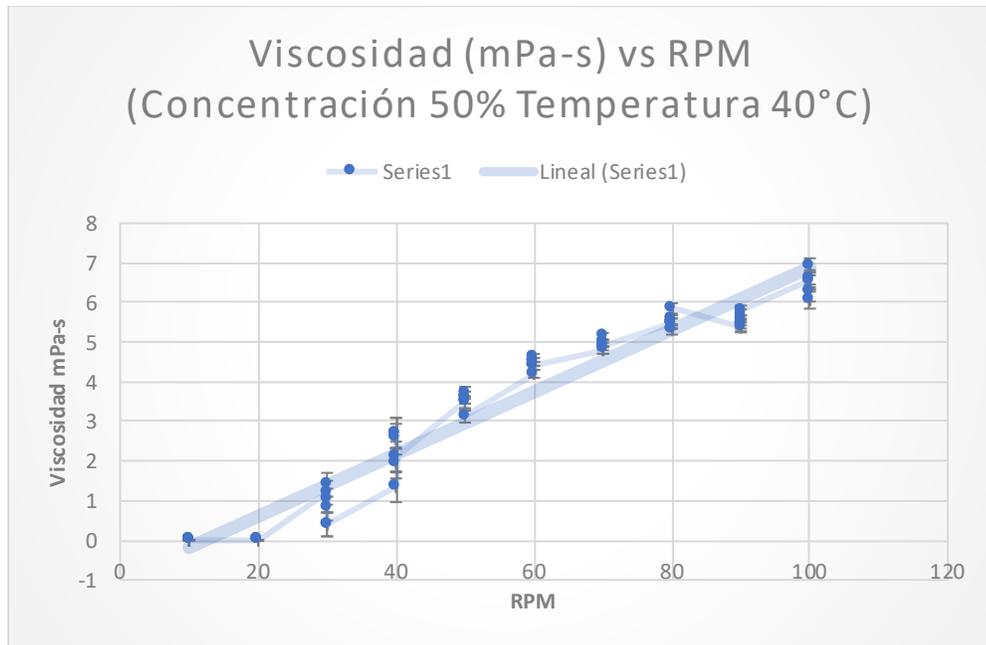
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada)



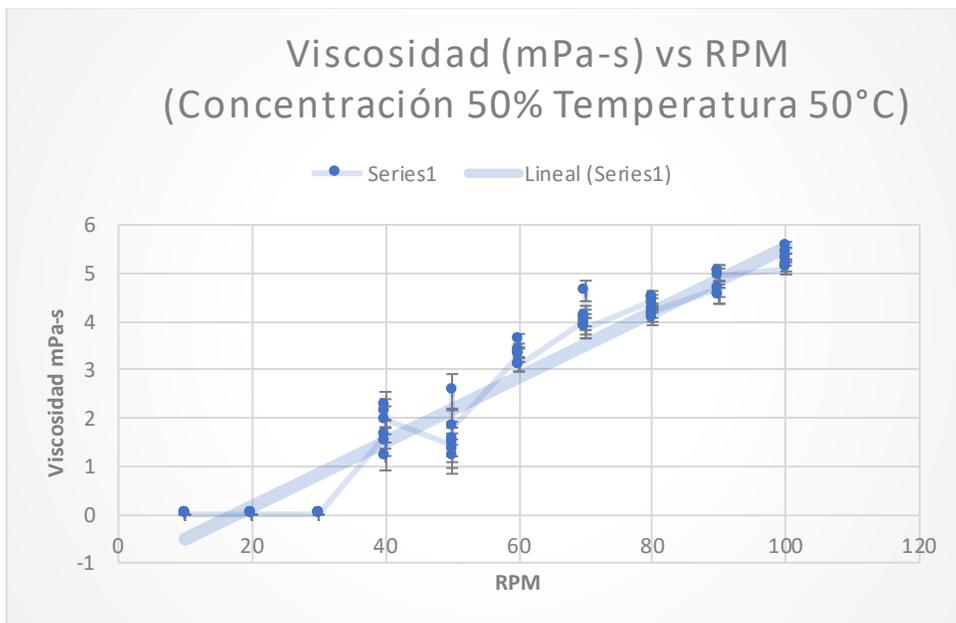
Gráfica 4.31 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.32 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

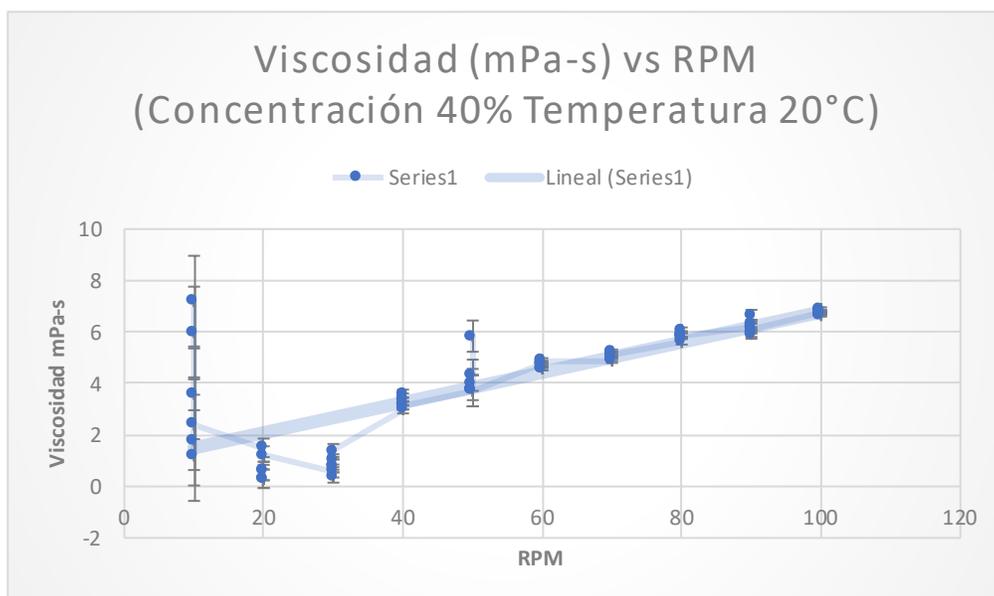


Gráfica 4.33 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50% de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

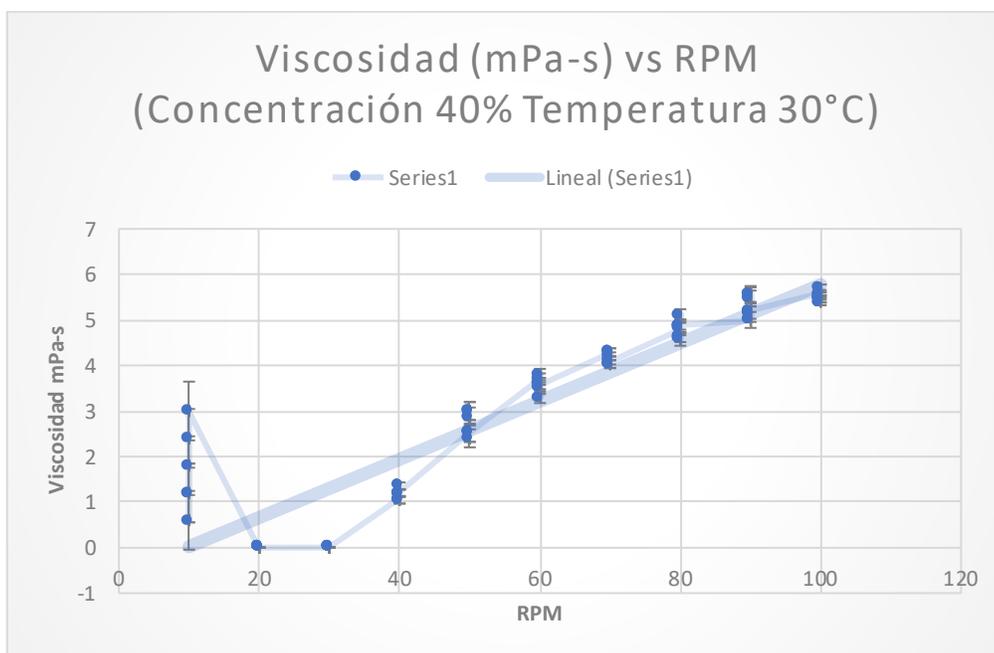


Gráfica 4.34 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (50% de Glicerina y 50% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

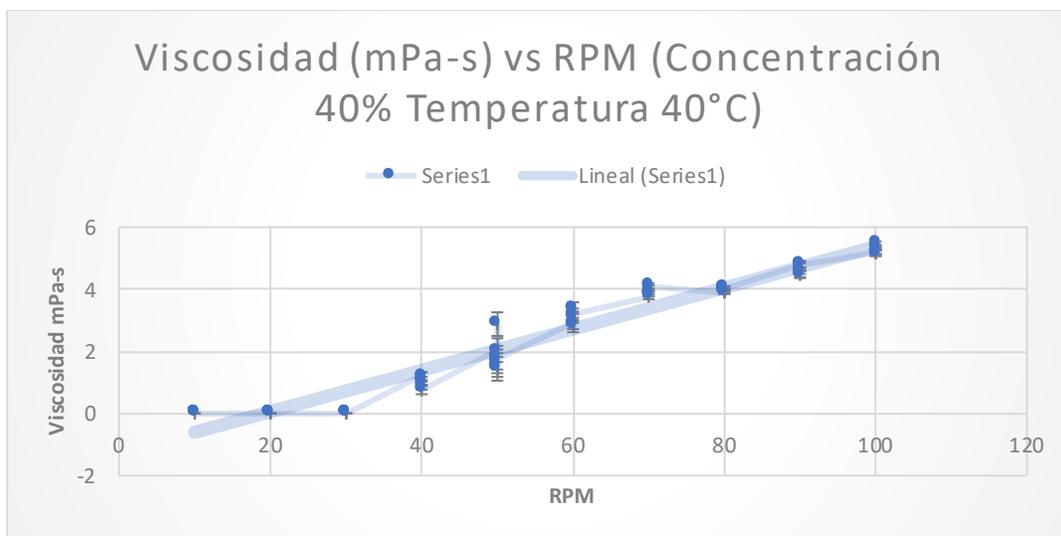
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada)



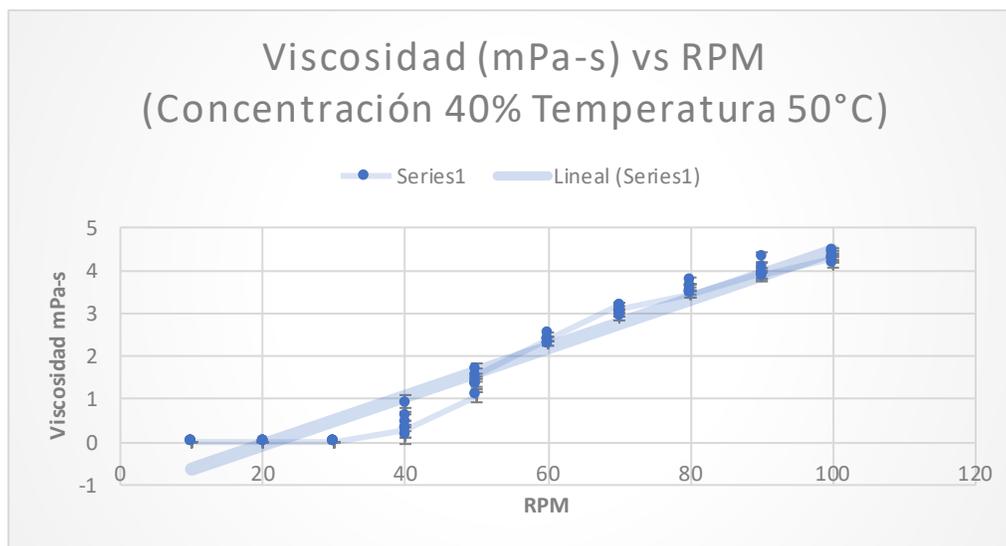
Gráfica 4.35 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.36 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



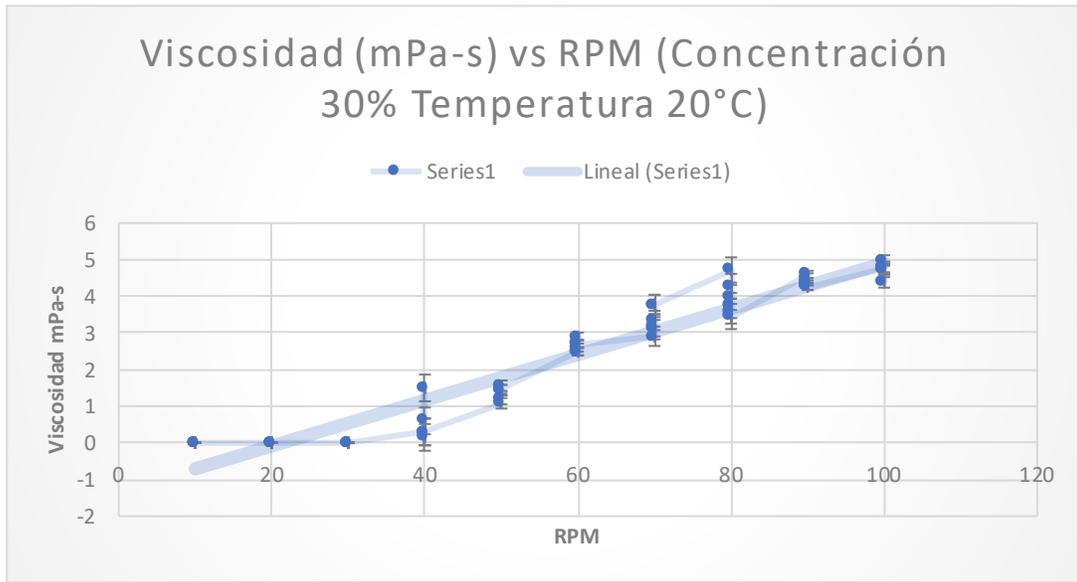
Gráfica 4.37 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40% de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



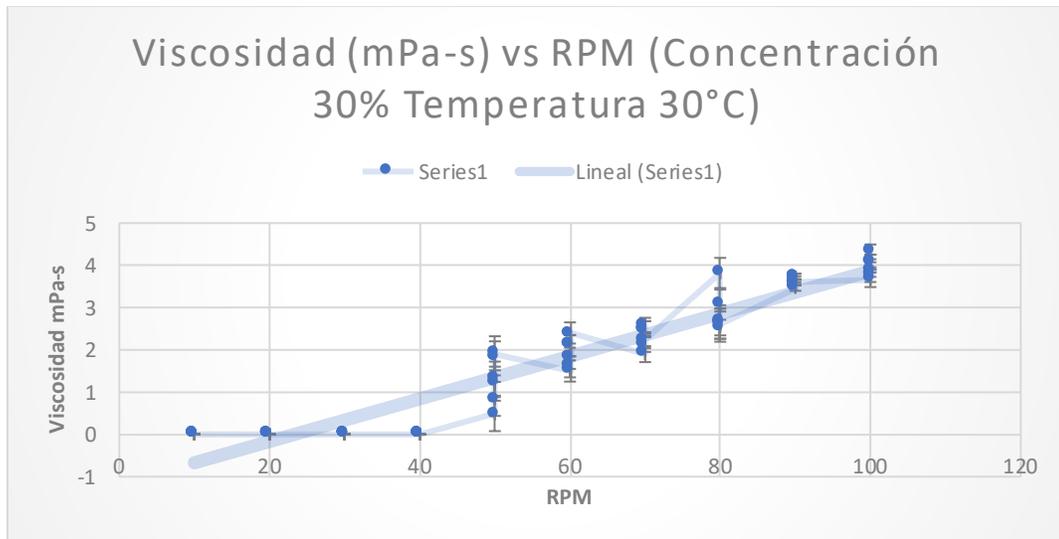
Gráfica 4.38 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (40% de Glicerina y 60% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

Anexos

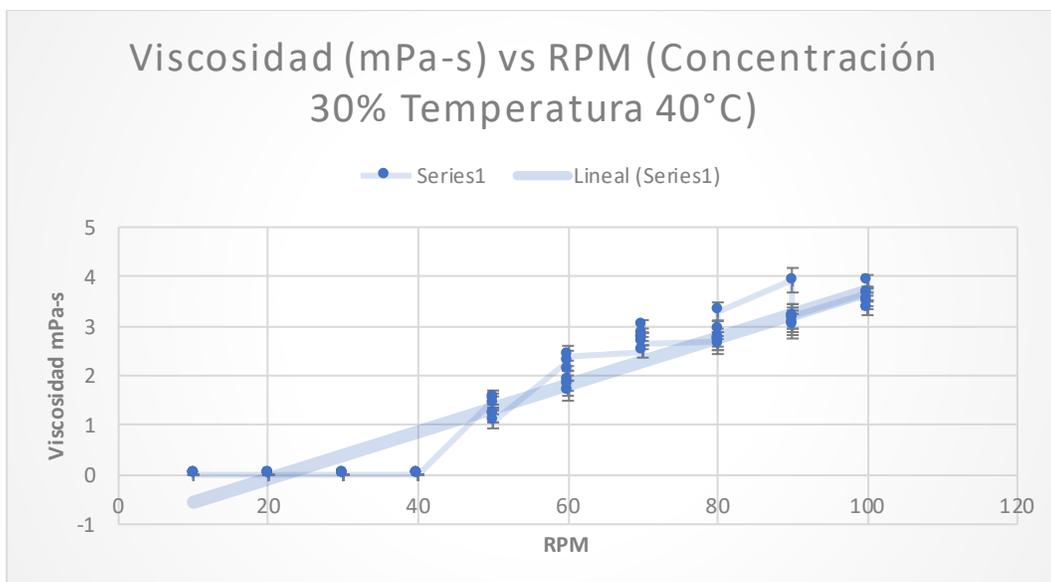
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada)



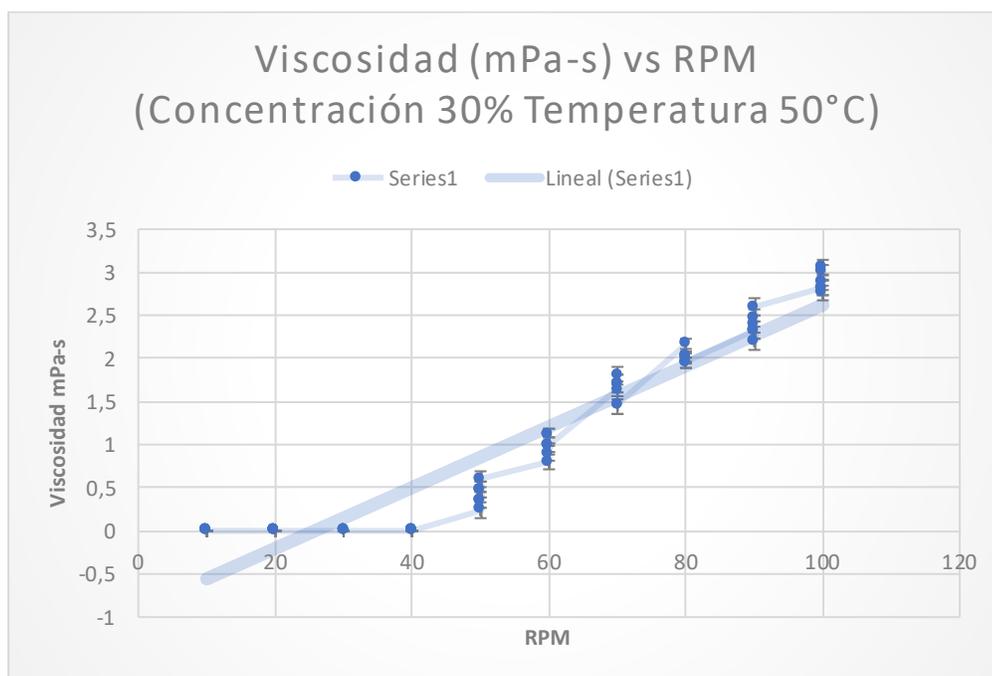
Gráfica 4.39 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.40 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

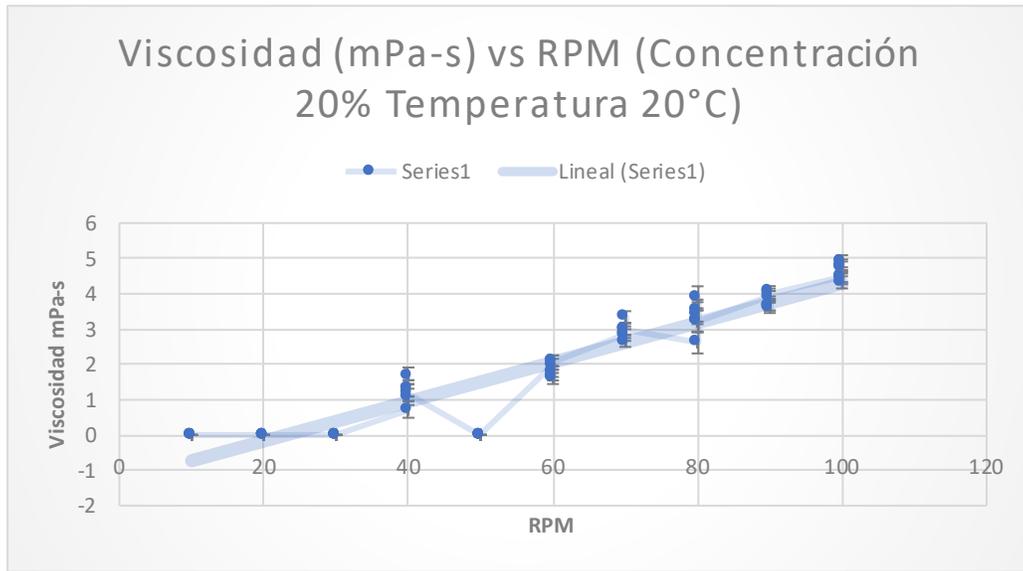


Gráfica 4.41 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30% de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

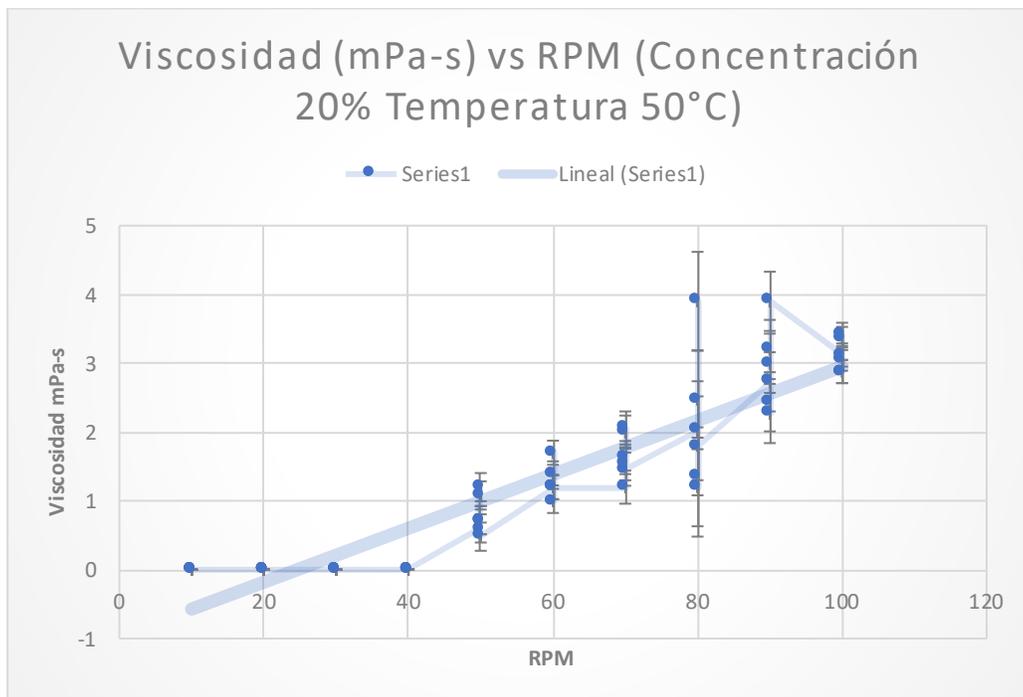


Gráfica 4.42 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (30% de Glicerina y 70% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada)



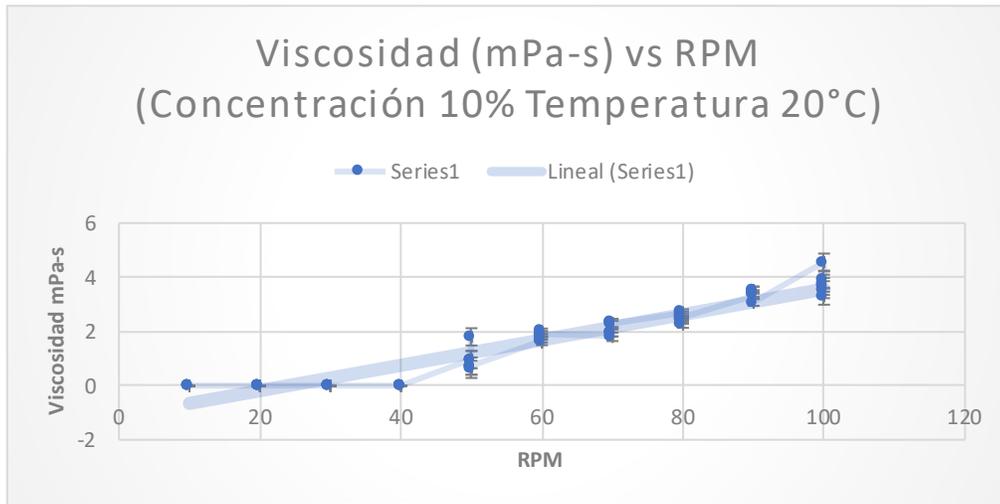
Gráfica 4.43 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



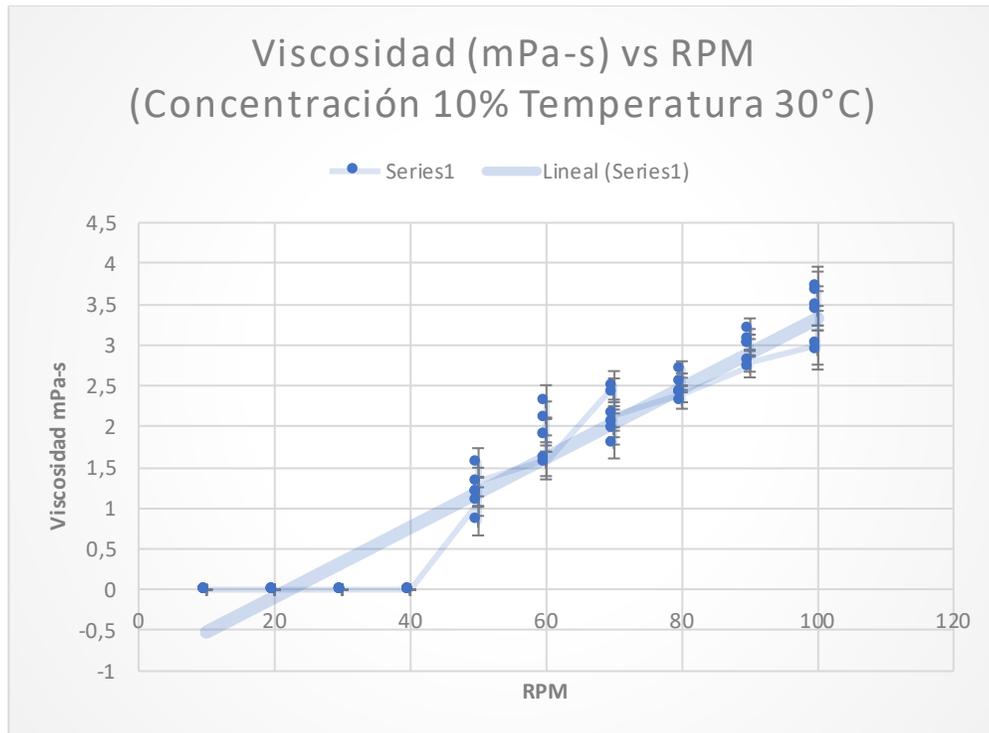
Gráfica 4.44 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

Anexos

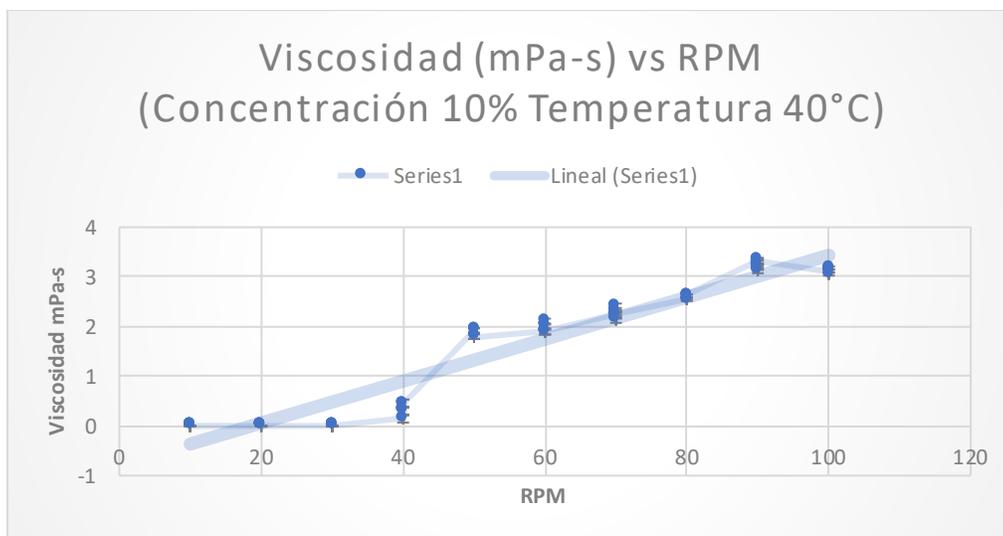
Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada)



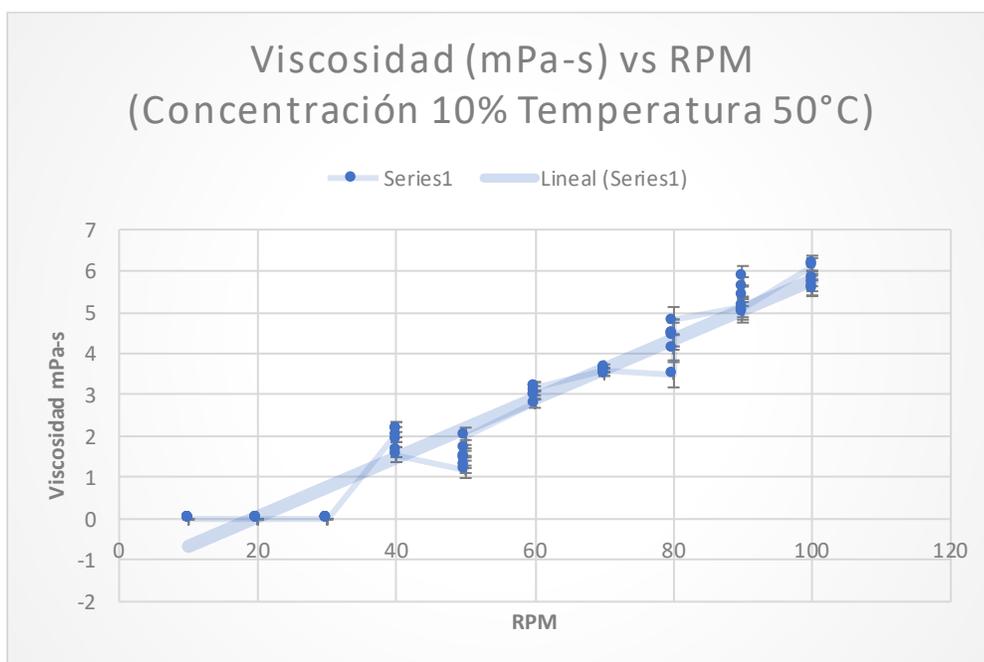
Gráfica 4.45 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 20°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



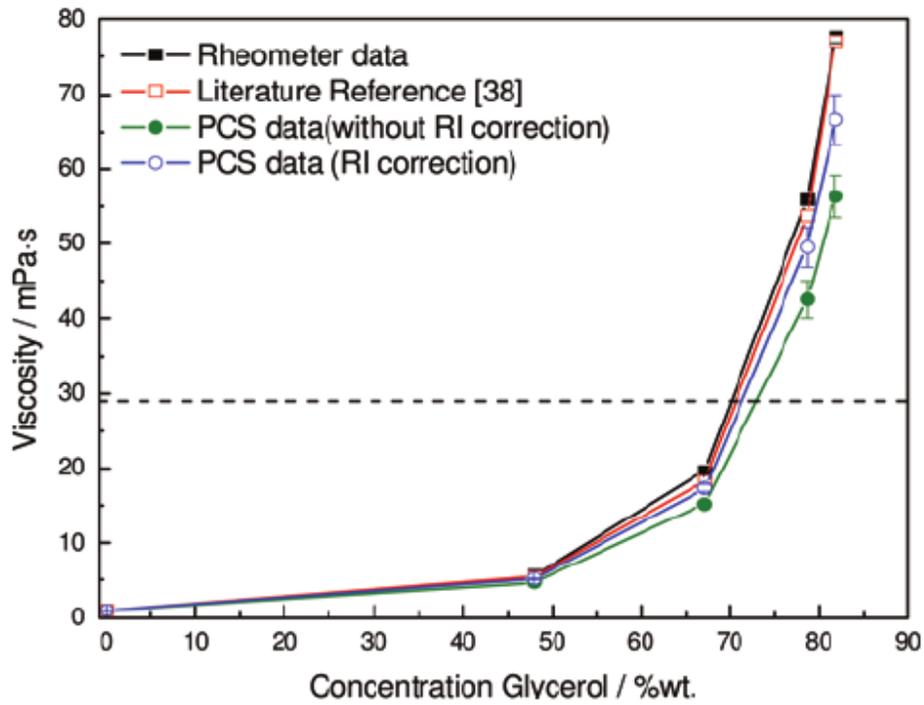
Gráfica 4.46 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 30°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.47 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 40°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.



Gráfica 4.48 Comportamiento de la viscosidad de la emulsión (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a una temperatura de 50°C. Rangos de velocidad de estudio de 10 a 100 RPM con intervalos de 10 RPM, 6 evaluaciones para cada intervalo.

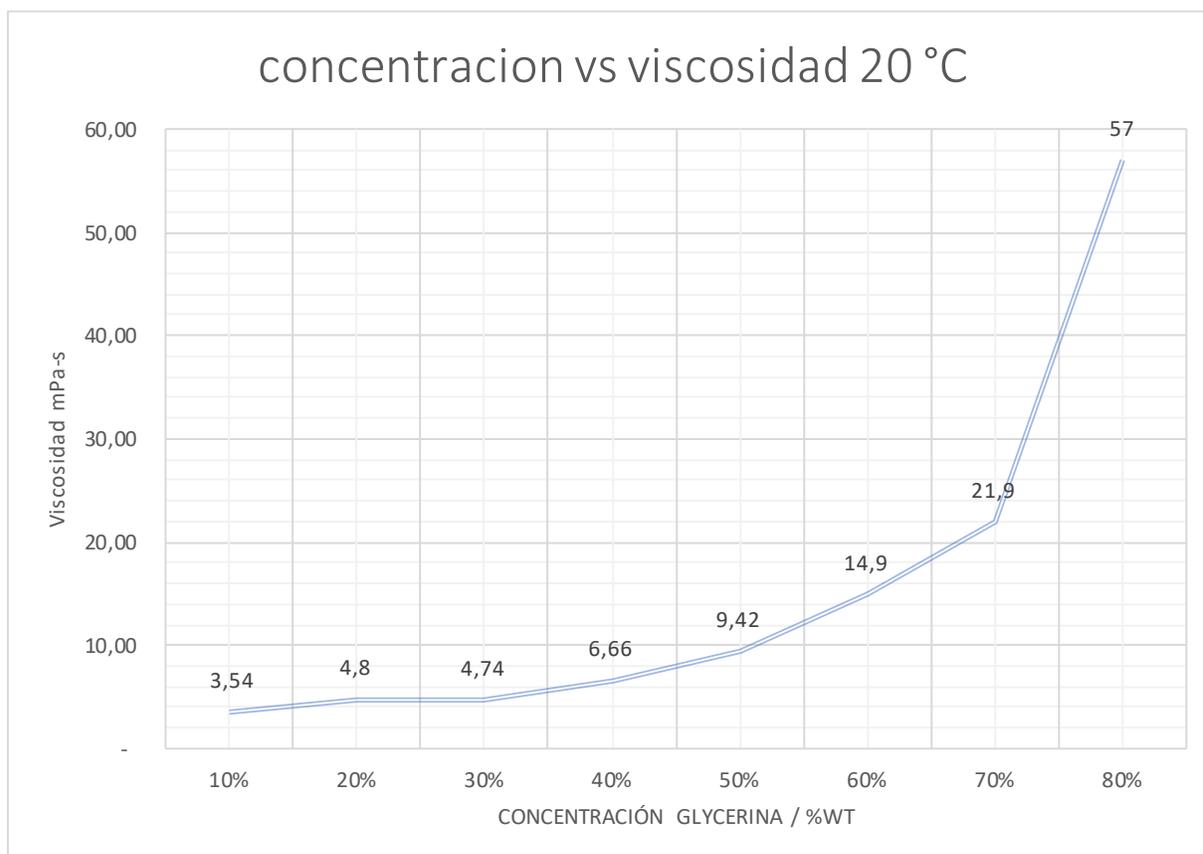


Gráfica 4.49 Reograma de referencia “Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa·s”, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionada con agua destilada a temperatura constante de 20°C.(Wagner et al., 2012)

Anexos

Tabla 5 Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 20°C.

TEMPERATURA 20°C	J20	I20	H20	G20	F20	E20	D20	C20
Viscosidad mPa-s	3,54	4,8	4,74	6,66	9,42	14,9	21,9	57
Concentración Glycerol/%wt	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%

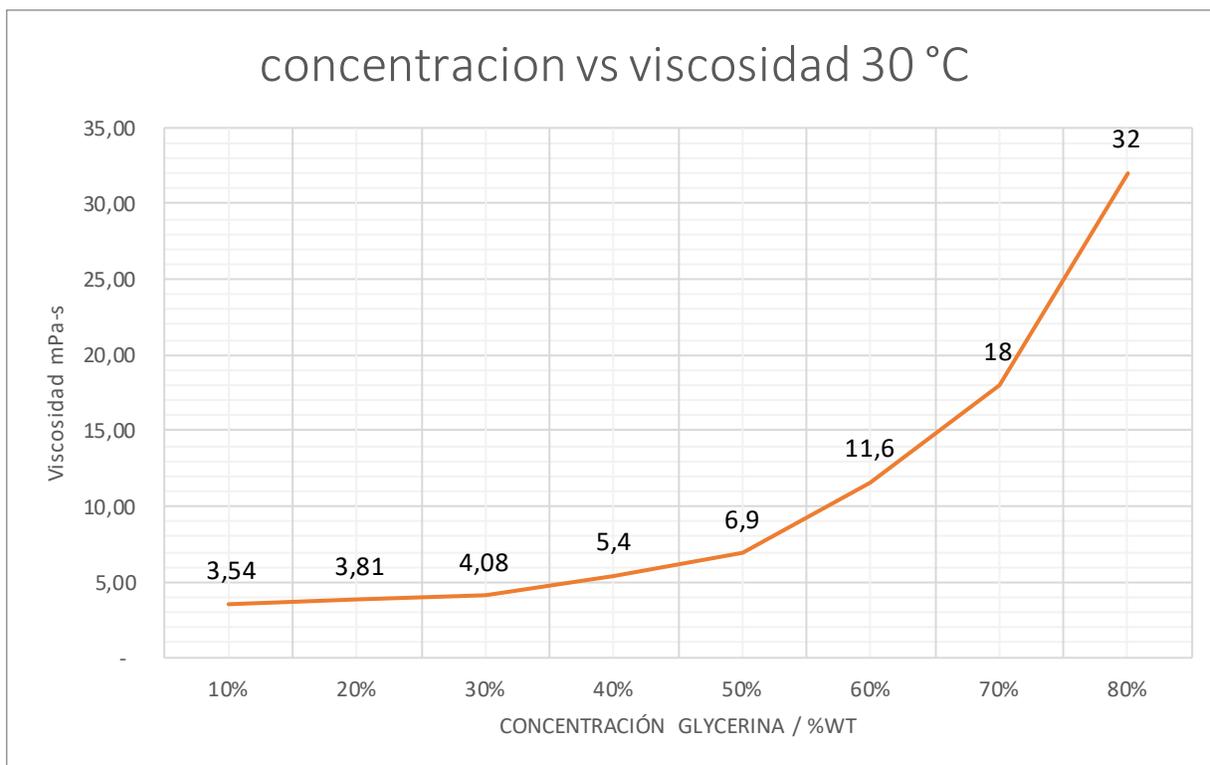


Gráfica 4.50 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.

Anexos

Tabla 6 Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 30°C.

TEMPERATURA 30°C	J30	I30	H30	G30	F30	E30	D30	C30
Viscosidad mPa-s	3,54	3,81	4,08	5,4	6,9	11,6	18	32
Concentración Glycerol/%wt	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%

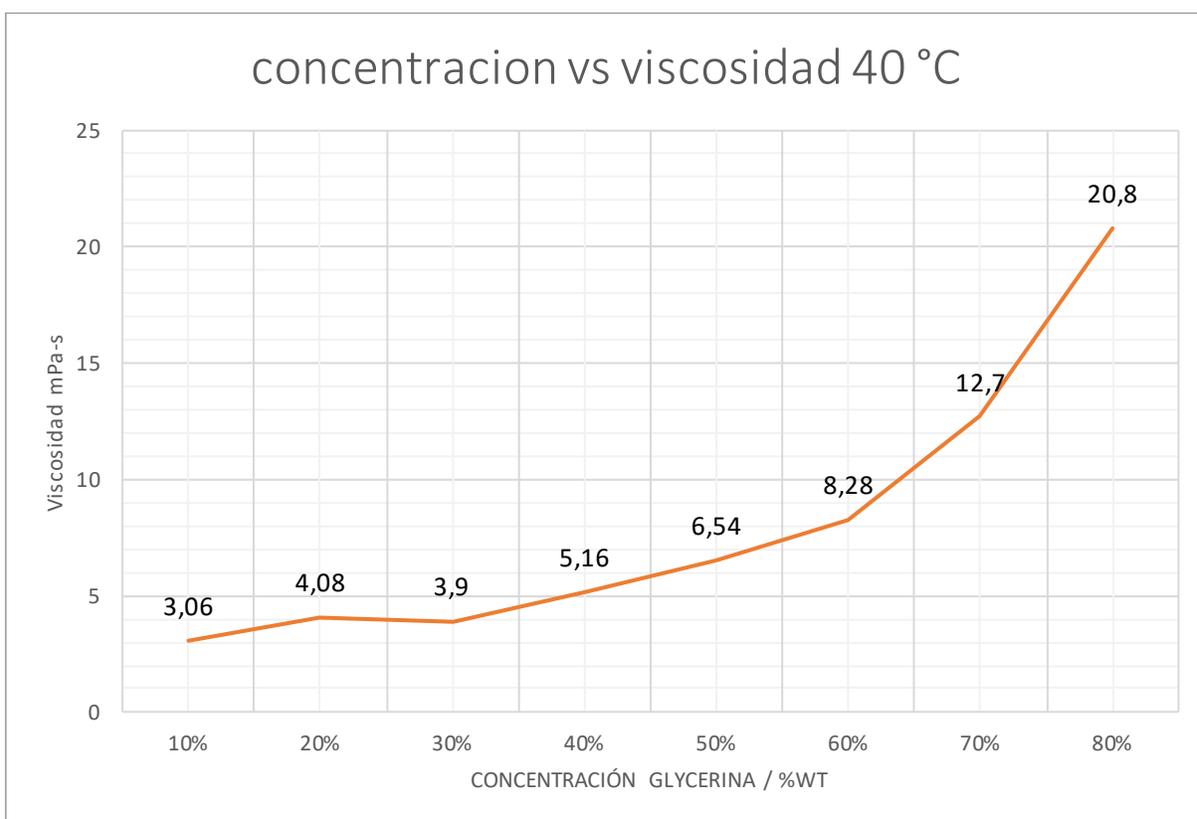


Gráfica 4.51 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 20°C.

Anexos

Tabla 7 Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 30°C.

TEMPERATURA 40°C	J40	I40	H40	G40	F40	E40	D40	C40
Viscosidad mPa-s	3,06	4,08	3,9	5,16	6,54	8,28	12,7	20,8
Concentración Glycerol/%wt	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%

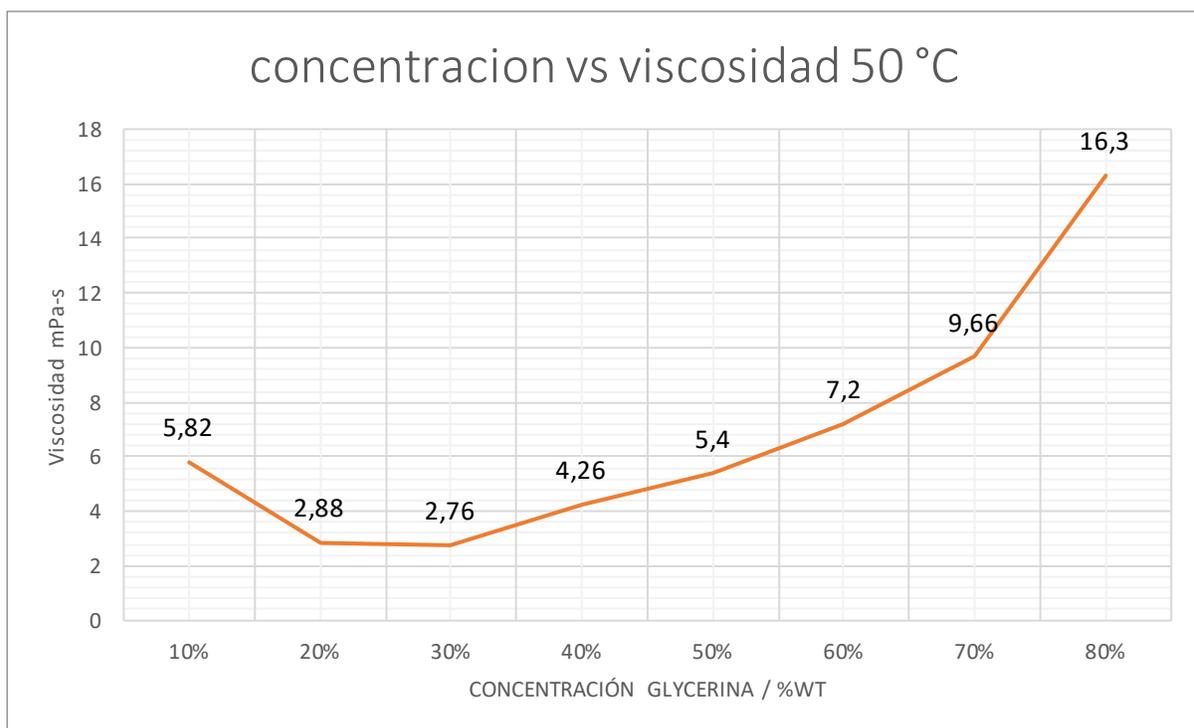


Gráfica 4.52 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 40°C.

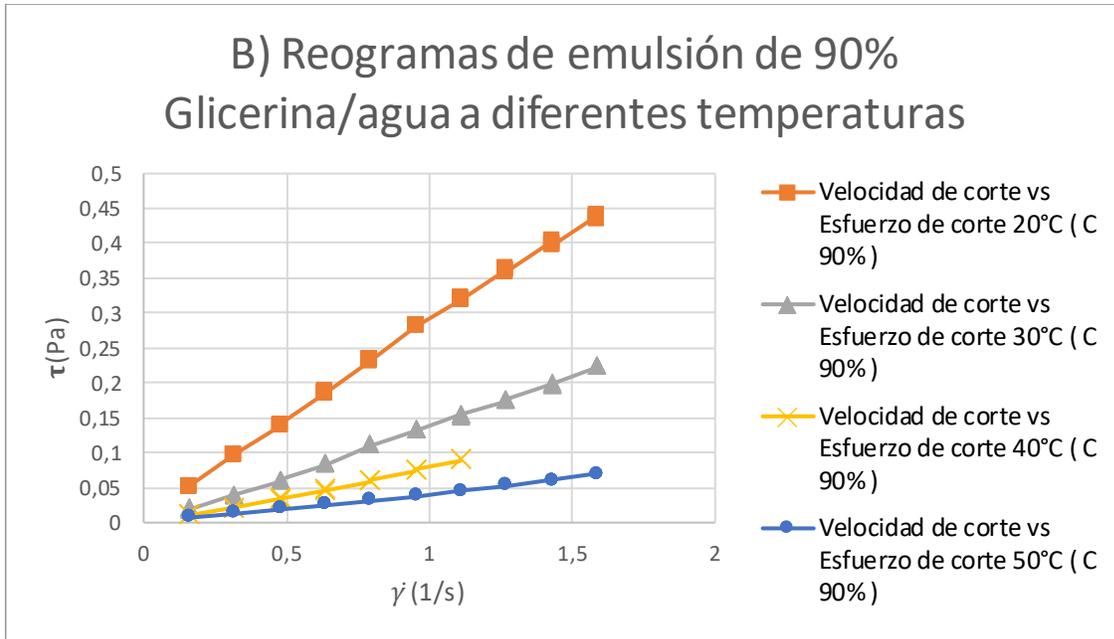
Anexos

Tabla 8 Datos Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Todas las concentraciones a temperatura constante de 50°C.

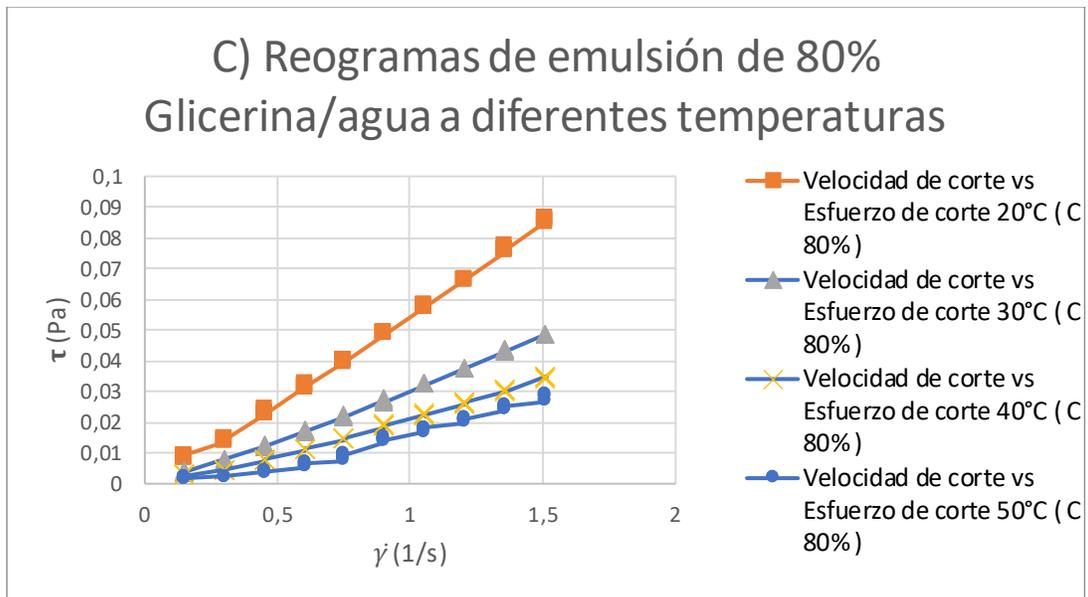
TEMPERATURA 50°C	J50	I50	H50	G50	F50	E50	D50	C50
Viscosidad mPa-s	5,82	2,88	2,76	4,26	5,4	7,2	9,66	16,3
Concentración Glycerol/%wt	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%



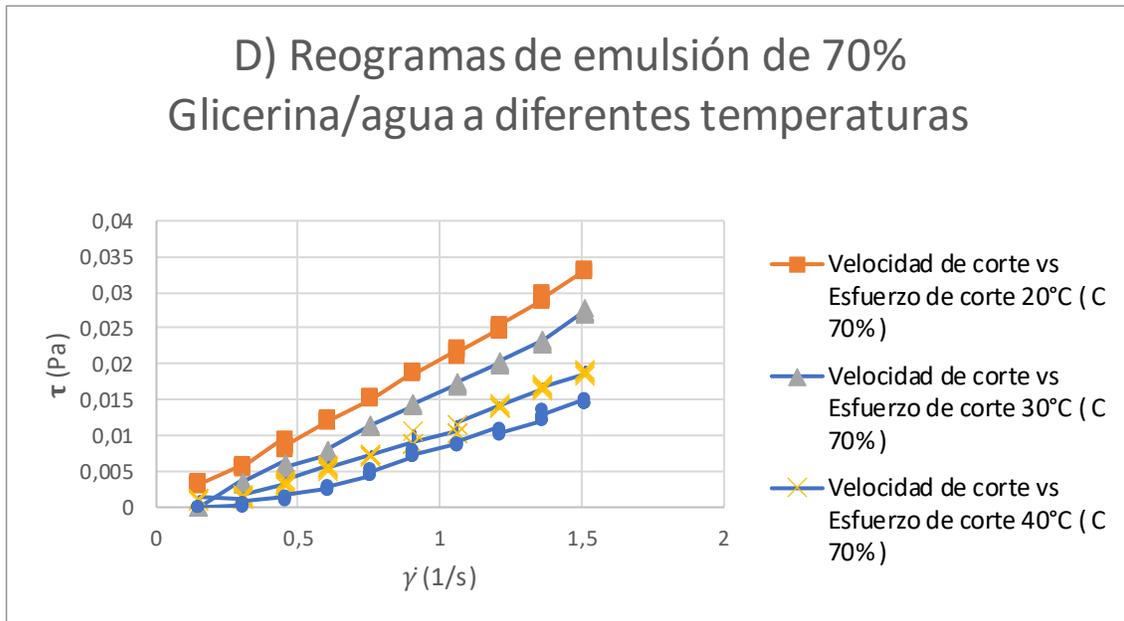
Gráfica 4.53 Reograma de Concentración (Glicerina/ % agua) vs Viscosidad mPa-s, Concentraciones de 0% a 80% de glicerina/glicerol emulsionado con agua destilada a temperatura constante de 50°C.



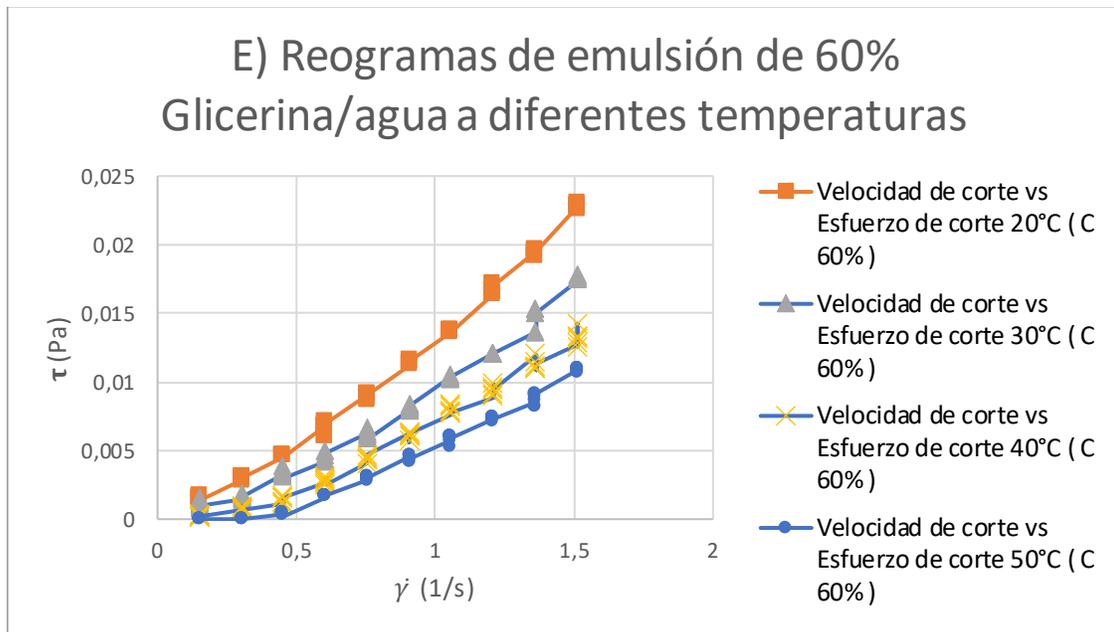
Gráfica 4.54 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (90 % de Glicerina y 10% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



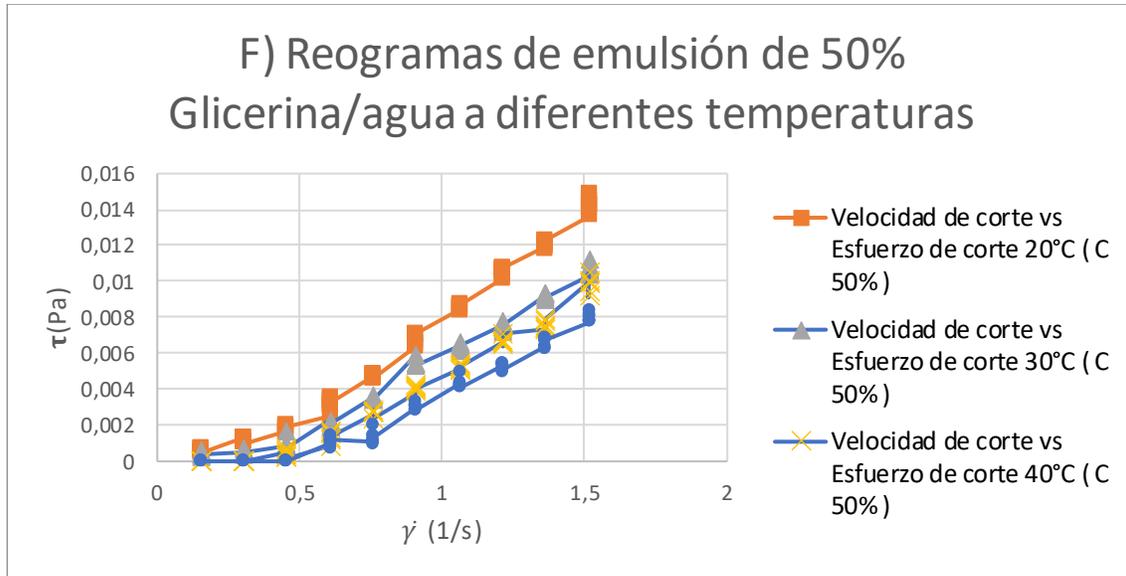
Gráfica 4.55 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (80 % de Glicerina y 20% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



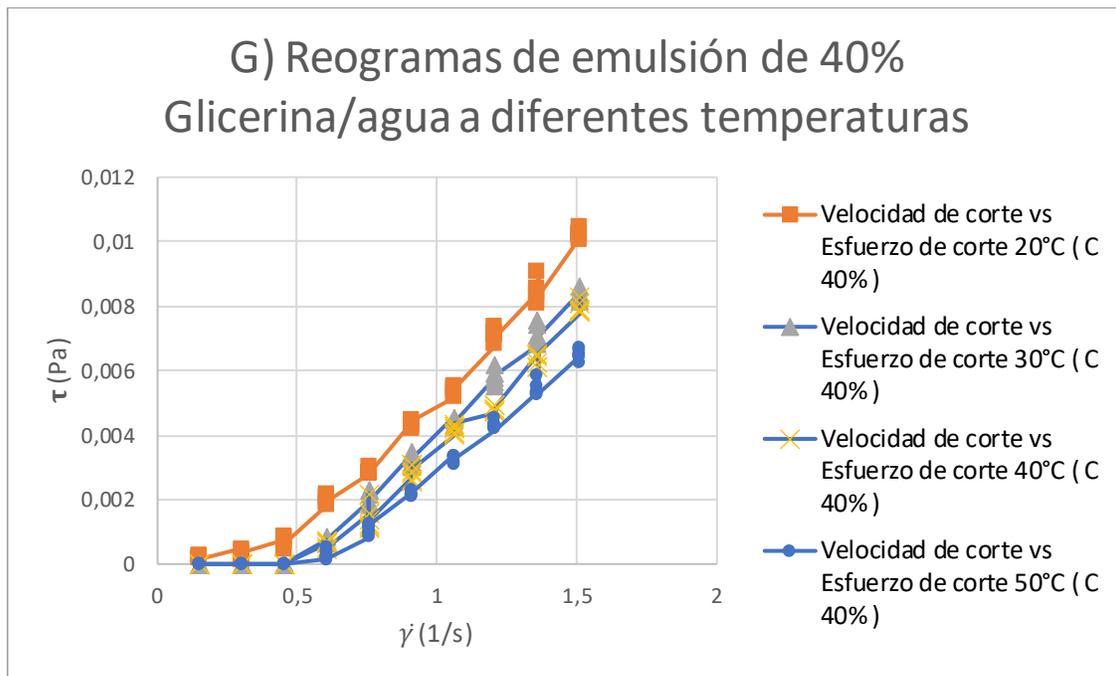
Gráfica 4.56 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (70 % de Glicerina y 30% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



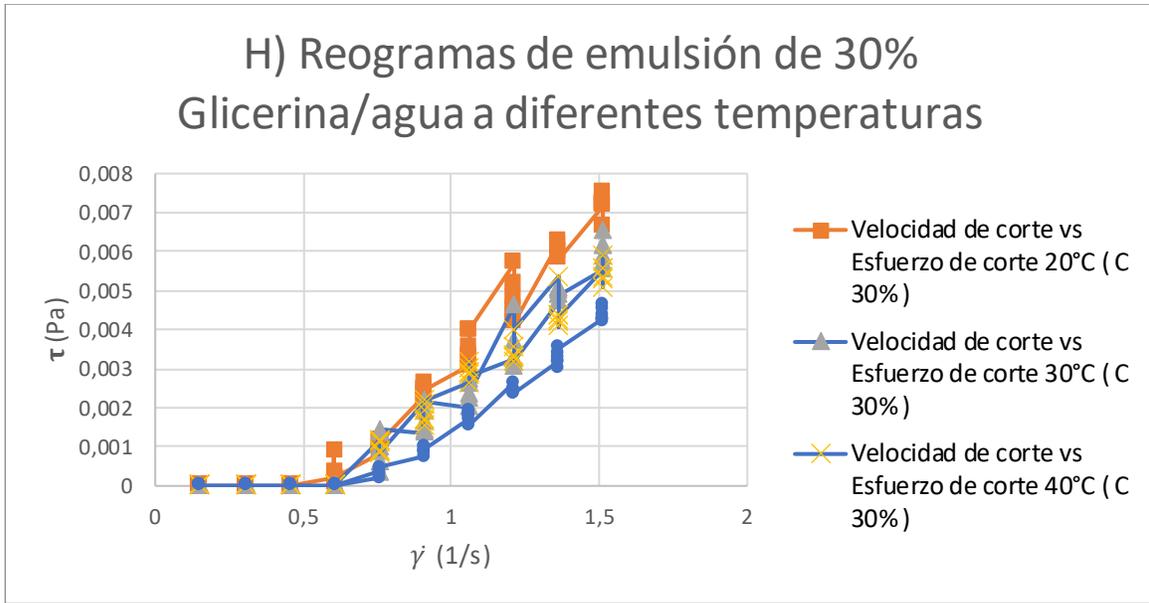
Gráfica 4.57 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (60 % de Glicerina y 40% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



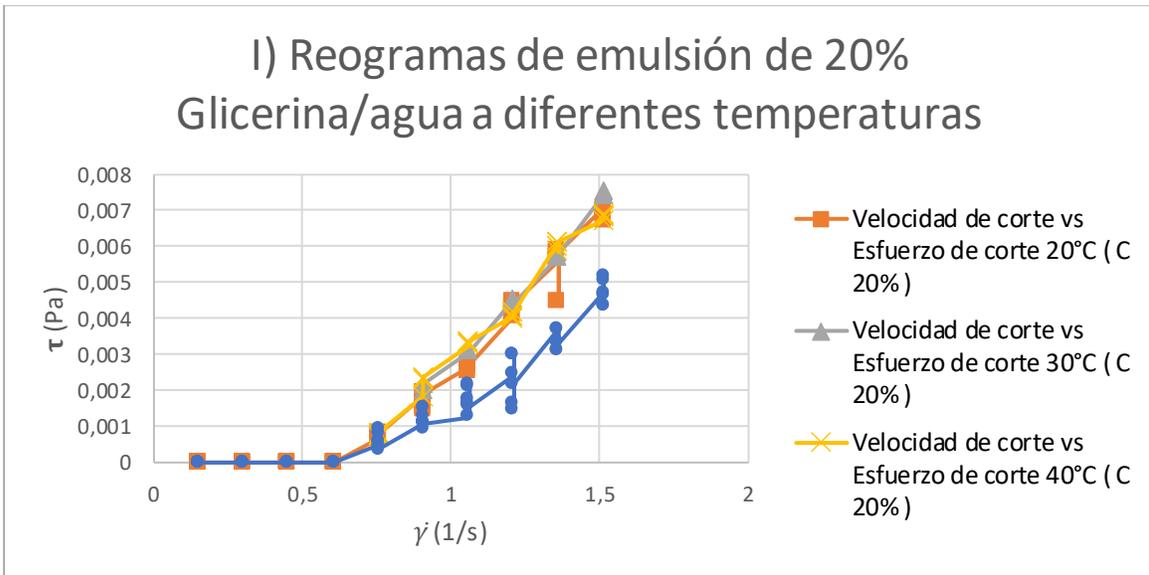
Gráfica 4.58 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (50 % de Glicerina y 50% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



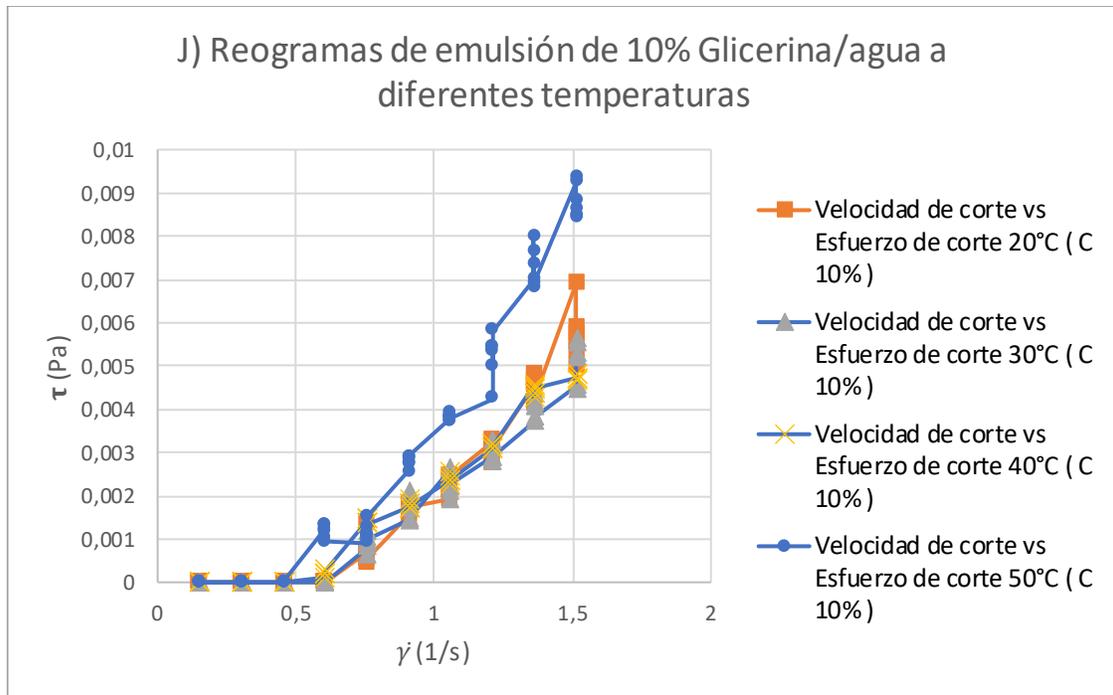
Gráfica 4.59 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (40 % de Glicerina y 60% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



Gráfica 4.60 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (30 % de Glicerina y 70% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



Gráfica 4.61 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (20 % de Glicerina y 80% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.



Gráfica 4.62 Reogramas de emulsión Esfuerzo de corte τ (Pa) versus velocidad de corte $\dot{\gamma}$ (1/seg) (10 % de Glicerina y 90% de agua destilada) a diferentes temperaturas. Dimensiones de husillo utilizado para el cálculo y análisis SP-1.

ANEXO 2: Tablas*Tabla 9 Resultados esperados*

Etapas principales	Contenidos conceptuales requeridos	Resultados esperados
Estudio reológico mediante laboratorio	Reología	Comprender los distintos tipos de comportamientos de los fluidos según parámetros y fundamentos de la reología.
	Rotavisc IKA	Generar un perfil de usuario exclusivo para la evaluación de cada mezcla en estudio.
	Mezclas de fluidos	Comprender los fundamentos para preparar mezclas de fluidos.
Recopilar datos reológicos	Creación de mezclas de fluidos	Tener mezclas de fluidos apropiadamente compuestas para el estudio.
	Control de la fuente termorreguladora	Tener un ambiente termorregulado estable para un estudio óptimo de análisis reológico.
	Evaluar mezclas	Tener diferentes valores reológicos para cada mezcla y a diferentes temperaturas y velocidad de giro de husillo del Reómetro.
	Toma de datos	Tener mediante el Reómetro ROTAVISC diferentes gráficas de comportamiento reológico.
Evaluación de datos	Modelos matemáticos para la reología	Tener modelos matemáticos que sustenten los fundamentos reológicos para el estudio.
	Evaluar datos mediante modelos matemáticos	Obtención de tabla de datos que describa el comportamiento reológico de cada mezcla de fluido en estudio.
Graficar datos y correlación	Graficar resultados	Obtener la representación gráfica del comportamiento reológico de cada mezcla de fluido.
	Correlación de datos	Encontrar una mezcla de fluido que tenga un comportamiento reológico similar al Magma.

Tabla 10 Metodología

Etapas principales	Contenidos conceptuales requeridos	Actividad
Estudio reológico mediante laboratorio	Reología	Estudiar los distintos tipos de comportamientos de los fluidos según parámetros y fundamentos de la reología
	Rotavisc IKA	Configurar y programar Reómetro ROTAVISCLO VI, marca IKA para el estudio y preparar zona de trabajo en el laboratorio.
	Mezclas de fluidos	Estudiar los fundamentos para preparar mezclas de fluidos.
Recopilación de datos reológicos	Creación de mezclas de fluidos	Preparar mezclas de fluidos y detallar sus porcentajes de mezcla y preparación.
	Control de la fuente termorreguladora	Preparar fuente termorreguladora para cada procedimiento de análisis en el laboratorio.
	Evaluar mezclas	Evaluación de mezclas de fluido a diferentes temperaturas y velocidad de giro RPM del husillo usando el Reómetro para el análisis
	Toma de datos	Obtención de datos mediante el Reómetro ROTAVISCLO VI para cada mezcla en estudio
Evaluación de datos	Modelos matemáticos para la reología	Ley de la Potencia, Herschel Bulkley y Casson
	Evaluar datos mediante modelos matemáticos	Evaluación de datos mediante modelos matemáticos para la reología
Gráfica de datos y correlación	Graficar resultados	Graficar los datos obtenidos mediante los modelos matemáticos para la reología para comprender el comportamiento reológico de cada mezcla de fluido en estudio
	Análisis de resultados	Comparación entre la gráfica de comportamiento reológico de las mezclas en estudio con la literatura.

4.5.1 Parámetros reológicos

Concentración 10% Glicerina y 90% agua destilada - (planilla J)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	555,7762703	560,7896634	0,133
	n	2,9426	2,9645	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00784996
	R ²	0,999620621	0,999620621	0,999620621
30	k (Pa.s ⁿ)	521,3147344	525,2910485	0,1113
	n	2,4162	2,4317	0
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00439569
	R ²	0,999970999	0,999970999	0
40	k (Pa.s ⁿ)	564,5468649	573,4558665	0,1137
	n	3,1153	3,1753	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00463761
	R ²	0,999986125	0,999986125	0,999986125
50	k (Pa.s ⁿ)	309,5993213	311,1716337	0,1429
	n	2,4602	2,472	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00698896
	R ²	0,999999589	0,999999589	0,999999589

Concentración 20% Glicerina y 80% agua destilada - (planilla I)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	488,8774439	492,8332492	0,1576
	n	3,251	3,2719	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,01205604
	R ²	0,977062885	0,977062885	0,977062885
30	k (Pa.s ⁿ)	366,9441767	368,6379141	0,145
	n	2,4519	2,4598	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00857476
	R ²	1	1	1
40	k (Pa.s ⁿ)	429,3386635	432,4142525	0,149
	n	3,0119	3,0302	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00962361
	R ²	0,999683476	0,999683476	0,999683476
50	k (Pa.s ⁿ)	722,2707043	730,4659895	0,1186
	n	3,0251	2,936	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00636804
	R ²	0,999833643	0,999833643	0,999833643

Anexos

Concentración 30% Glicerina y 70% agua destilada - (planilla H)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	374,369104	376,5303604	0,1426
	n	2,6918	2,7051	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00790321
	R ²	0,999984634	0,999984634	0,999984634
30	k (Pa.s ⁿ)	490,5688861	494,4245193	0,132
	n	2,7658	2,7845	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,007225
	R ²	0,99987942	0,99987942	0,99987942
40	k (Pa.s ⁿ)	459,5153252	462,5940048	0,1141
	n	2,376	2,3897	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00438244
	R ²	0,999538799	0,999538799	0,999538799
50	k (Pa.s ⁿ)	908,0295876	924,0596356	0,1322
	n	3,7135	3,7645	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00927369
	R ²	0,999479403	0,999479403	0,999479403

Concentración 40% Glicerina y 60% agua destilada - (planilla G)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	204,3619321	204,9273858	0,1264
	n	1,81	1,8154	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00305809
	R ²	0,999976125	0,999976125	0,999976125
30	k (Pa.s ⁿ)	290,0681199	291,6083799	0,1406
	n	2,5618	2,5766	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,006241
	R ²	0,999996062	0,999996062	0,999996062
40	k (Pa.s ⁿ)	339,8599585	341,9794425	0,1401
	n	2,7271	2,7455	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00687241
	R ²	0,999964365	0,999964365	0,999964365
50	k (Pa.s ⁿ)	472,0630413	478,6300923	0,142
	n	3,433	3,4874	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00835396
	R ²	0,999994818	0,999994818	0,999994818

Anexos

Concentración 50% Glicerina y 50% agua destilada - (planilla F)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	134,7410725	135,0205896	0,1313
	n	1,6454	1,6514	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00188356
	R ²	0,999990306	0,999990306	0,999990306
30	k (Pa.s ⁿ)	187,7586699	188,4082866	0,1246
	n	1,9975	2,0117	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00245025
	R ²	0,999954693	0,999954693	0,999954693
40	k (Pa.s ⁿ)	244,8499389	246,3201838	0,1384
	n	2,5916	2,6174	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00505521
	R ²	0,999940564	0,999940564	0,999940564
50	k (Pa.s ⁿ)	311,6018303	313,1843125	0,1326
	n	2,388	2,4003	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00541696
	R ²	0,999993693	0,999993693	0,999993693

Concentración 60% Glicerina y 40% agua destilada - (planilla E)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	77,73202828	77,8036551	0,1348
	n	1,1967	1,1998	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00039601
	R ²	0,99999998	0,99999998	0,99999998
30	k (Pa.s ⁿ)	107,2753648	107,4236736	0,1213
	n	1,2749	1,2797	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,000529
	R ²	0,999939522	0,999939522	0,999939522
40	k (Pa.s ⁿ)	149,6580217	149,8994364	0,1254
	n	1,8833	1,9096	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00172225
	R ²	0,999957175	0,999957175	0,999957175
50	k (Pa.s ⁿ)	219,5330949	220,6480024	0,1469
	n	2,6261	2,6492	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00574564
	R ²	0,998292753	0,998292753	0,998292753

Anexos

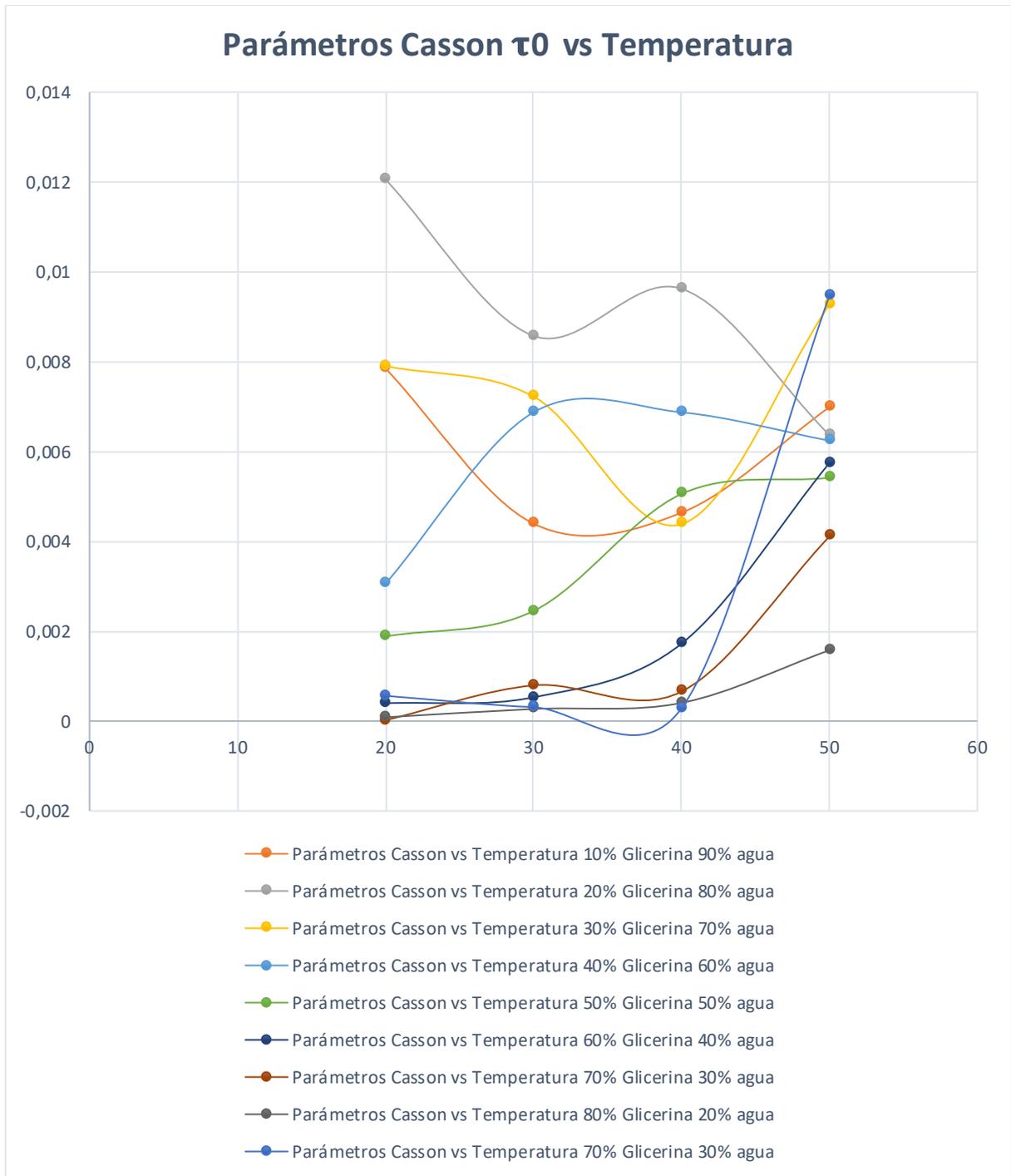
Concentración 70% Glicerina y 30% agua destilada - (planilla D)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	48,26140933	48,29475864	0,1492
	n	1,0098	1,0112	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00002025
	R ²	0,999990413	0,999990413	0,999990413
30	k (Pa.s ⁿ)	62,53166607	62,58928639	0,1556
	n	1,2691	1,2709	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00079524
	R ²	0,999995657	0,999995657	0,999995657
40	k (Pa.s ⁿ)	94,77635453	94,90738339	0,1303
	n	1,3018	1,3062	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00065536
	R ²	0,999995291	0,999995291	0,999995291
50	k (Pa.s ⁿ)	137,0881766	137,467489	0,1523
	n	2,2378	2,2557	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00410881
	R ²	0,999964874	0,999964874	0,999964874

Concentración 80% Glicerina y 20% agua destilada - (planilla C)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	18,46290351	18,36538343	0,243
	n	1,0256	1,0839	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00008464
	R ²	0,999964996	0,999964996	0,999964996
30	k (Pa.s ⁿ)	33,22002845	33,18944576	0,1908
	n	1,153	1,1548	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00026896
	R ²	0,99999882	0,99999882	0,99999882
40	k (Pa.s ⁿ)	48,48417387	48,51767712	0,1651
	n	1,1557	1,1575	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00040401
	R ²	0,999993357	0,999993357	0,999993357
50	k (Pa.s ⁿ)	68,123978	68,1867514	0,1649
	n	1,3494	1,3525	0,5
	τ_0	0	1,21744E-05	0,00157609
	R ²	0,999992915	0,999992915	0,999992915

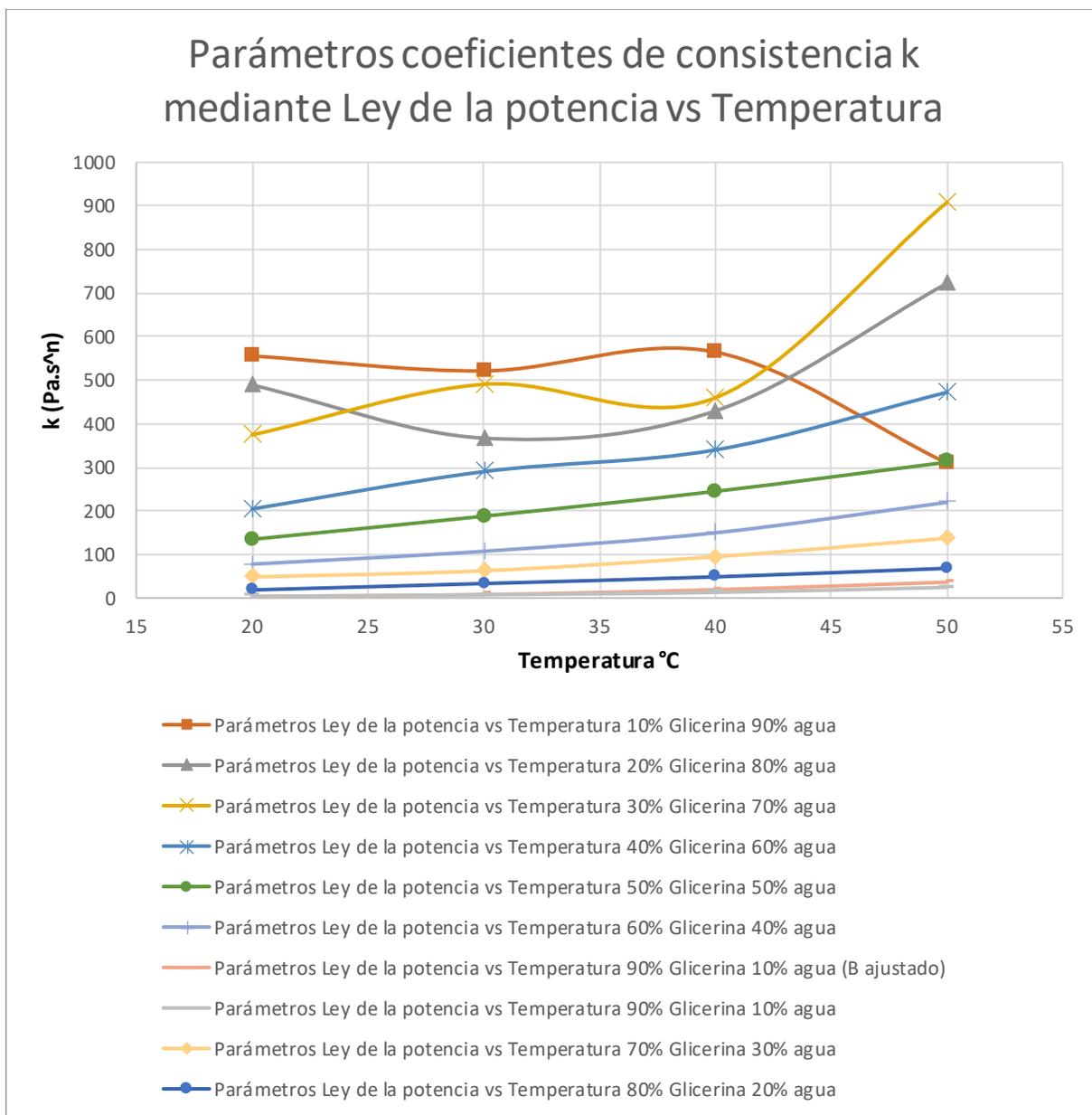
Anexos

Concentración 90% Glicerina y 10% agua destilada - (planilla B AJUSTADO)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	3,485780211	3,6551062	0,511
	n	0,9446	1,0426	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00056169
	R ²	0,999999989	0,999999989	0,999999989
30	k (Pa.s ⁿ)	7,816278046	8,64569678	0,3761
	n	1,0594	1,4726	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00030976
	R ²	0,999934107	0,999934107	0,999934107
40	k (Pa.s ⁿ)	19,09413549	26,06753708	0,2114
	n	1,099505223	1,4914	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00028224
	R ²	0,99996737	0,99996737	0,99996737
50	k (Pa.s ⁿ)	36,36637393	76,91304403	0,2272
	n	0,883704489	1,4452	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00946729
	R ²	-2,74827181	-2,74827181	-2,74827181

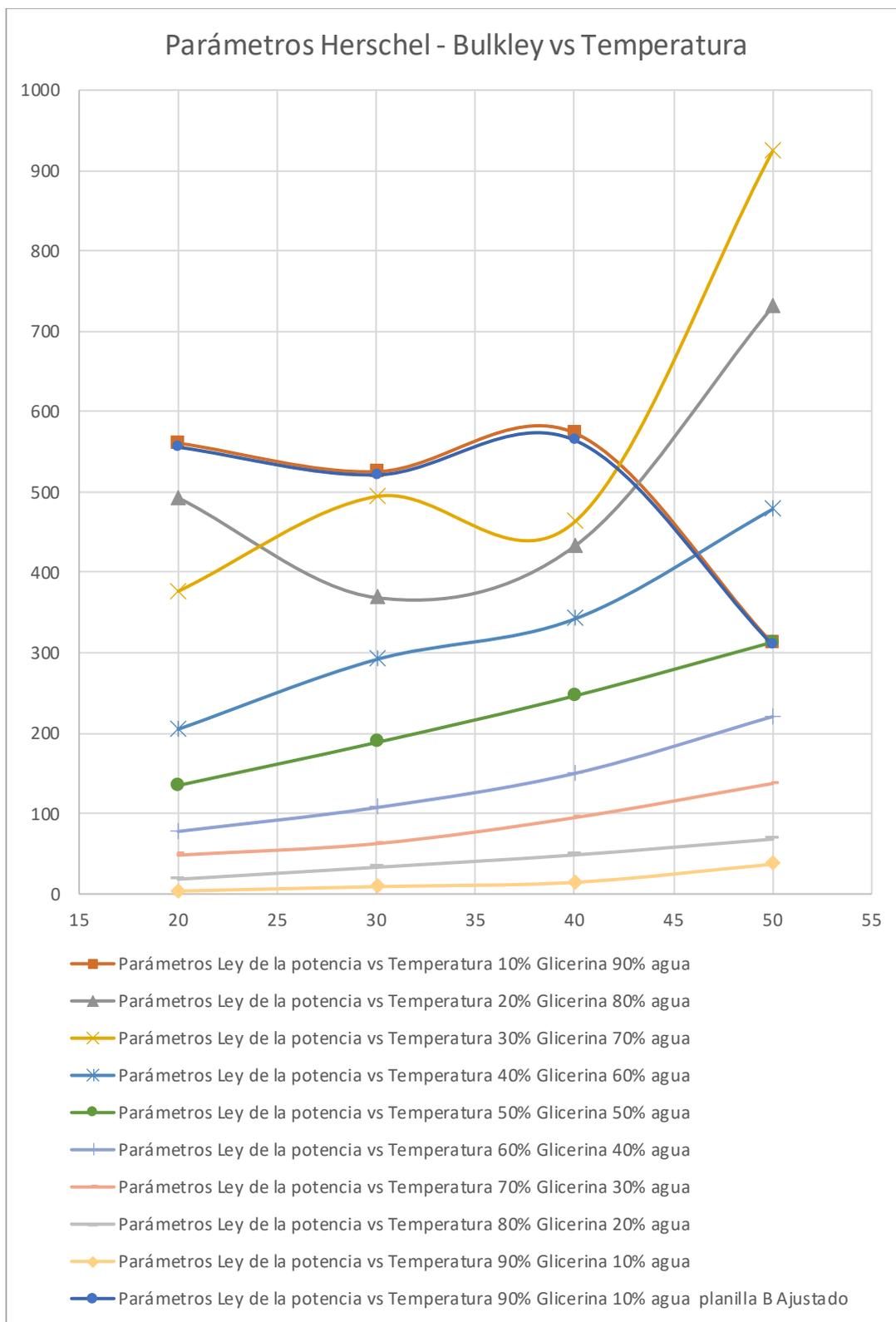
Concentración 90% Glicerina y 10% agua destilada - (planilla B)				
T°C	Parámetro	Ley de la potencia	Herschel - Bulkley	Casson
20	k (Pa.s ⁿ)	3,485780211	3,6551062	0,511
	n	0,9445	1,0424	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00056644
	R ²	0,999987133	0,999987133	0,999987133
30	k (Pa.s ⁿ)	7,33162089	9,144500753	0,3914
	n	1,0785	1,4435	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00045369
	R ²	0,989433782	0,989433782	0,989433782
40	k (Pa.s ⁿ)	12,86470998	14,49772975	0,3004
	n	1,0982	1,6759	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,000441
	R ²	0,999999973	0,999999973	0,999999973
50	k (Pa.s ⁿ)	24,31644038	37,02542054	0,2057
	n	1,018122582	1,7038	0,5
	τ_0	0	0,012174396	0,00000441
	R ²	0,999907512	0,999907512	0,999907512



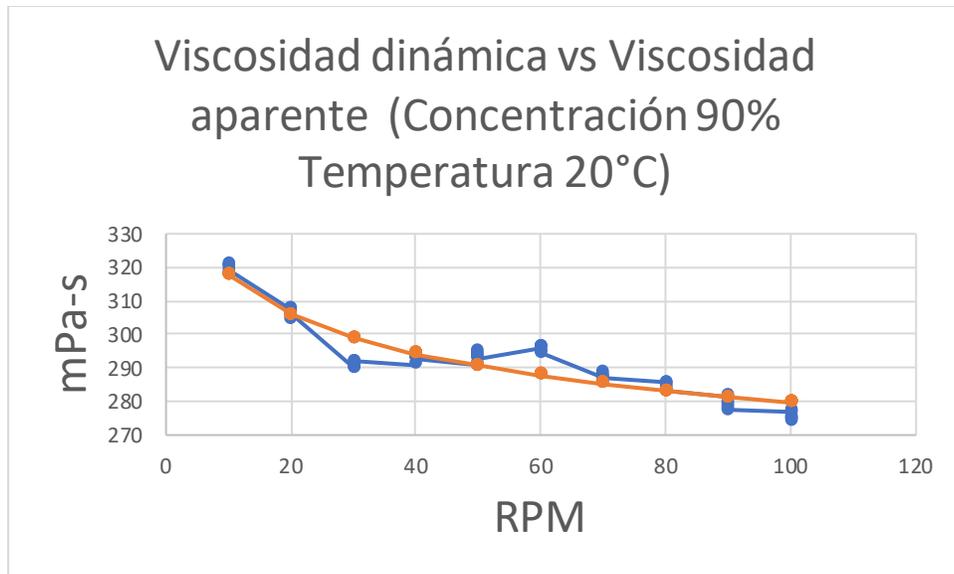
Gráfica 4.63 Reograma de Coeficiente de consistencia k mediante Casson vs Temperatura



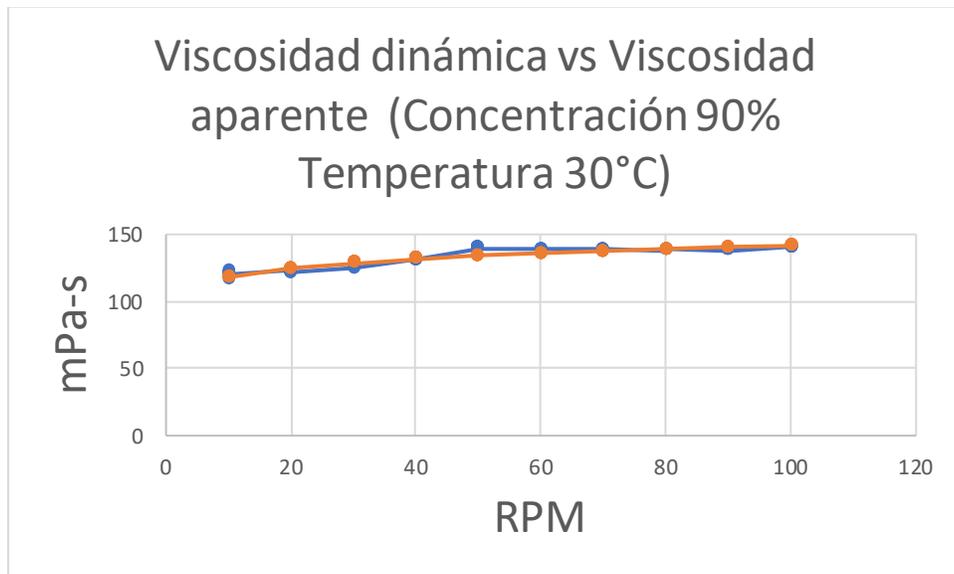
Gráfica 4.64 Reograma de Coeficiente de consistencia k mediante Ley de la potencia vs Temperatura



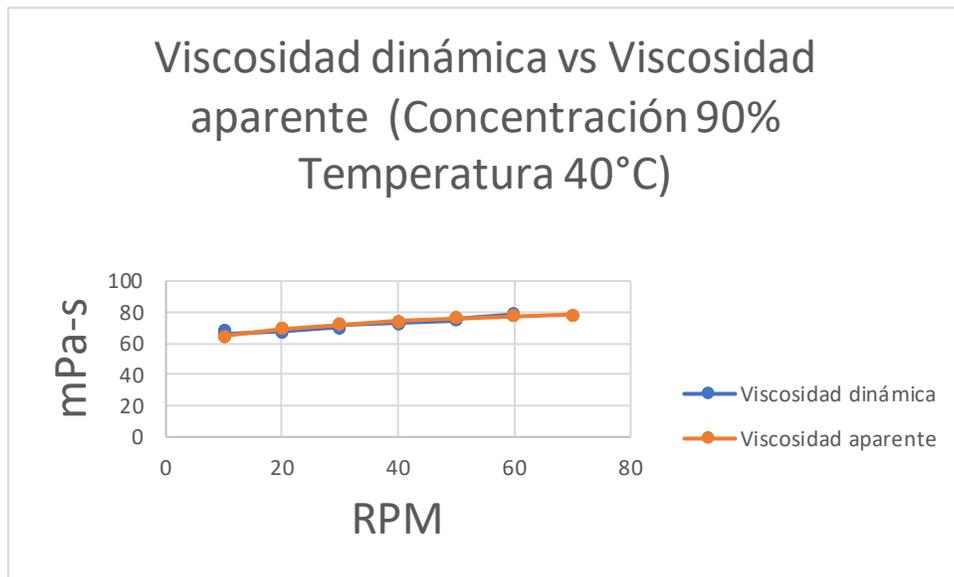
Gráfica 4.65 Reograma de Coeficiente de consistencia k mediante Herschel – Bulkley vs Temperatura



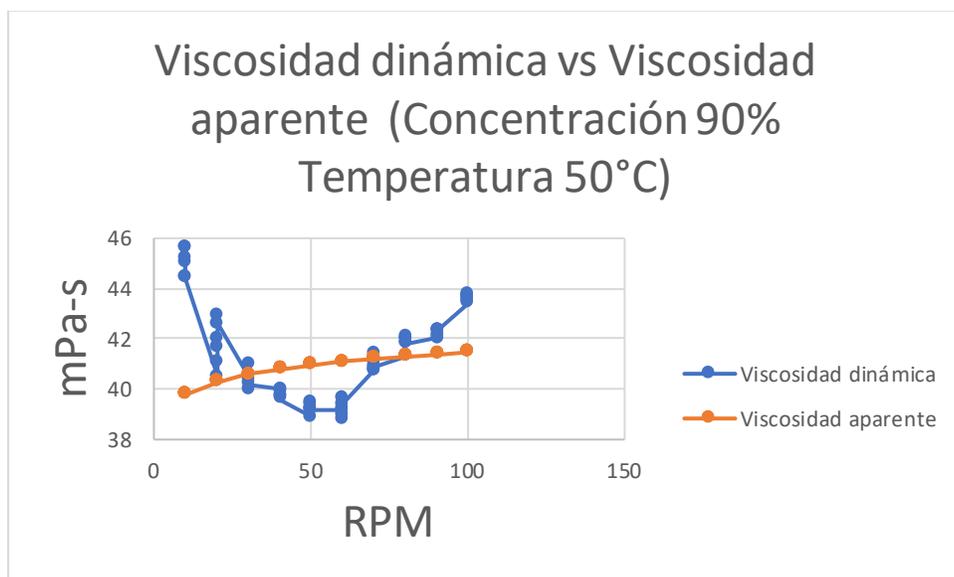
Gráfica 4.66 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 20°C)



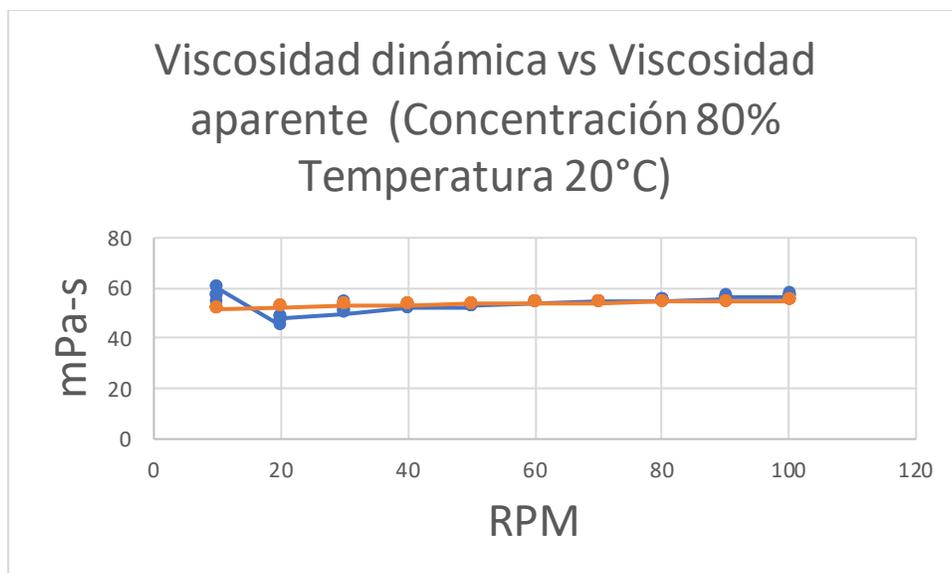
Gráfica 4.67 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 30°C)



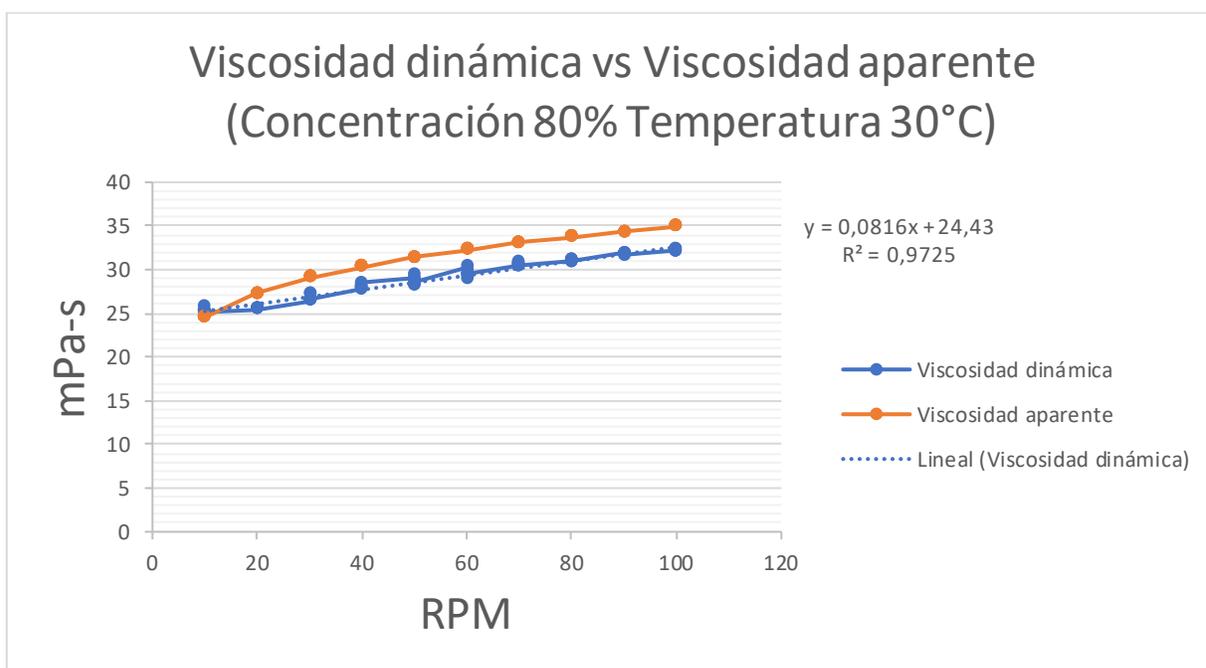
Gráfica 4.68 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 40°C)



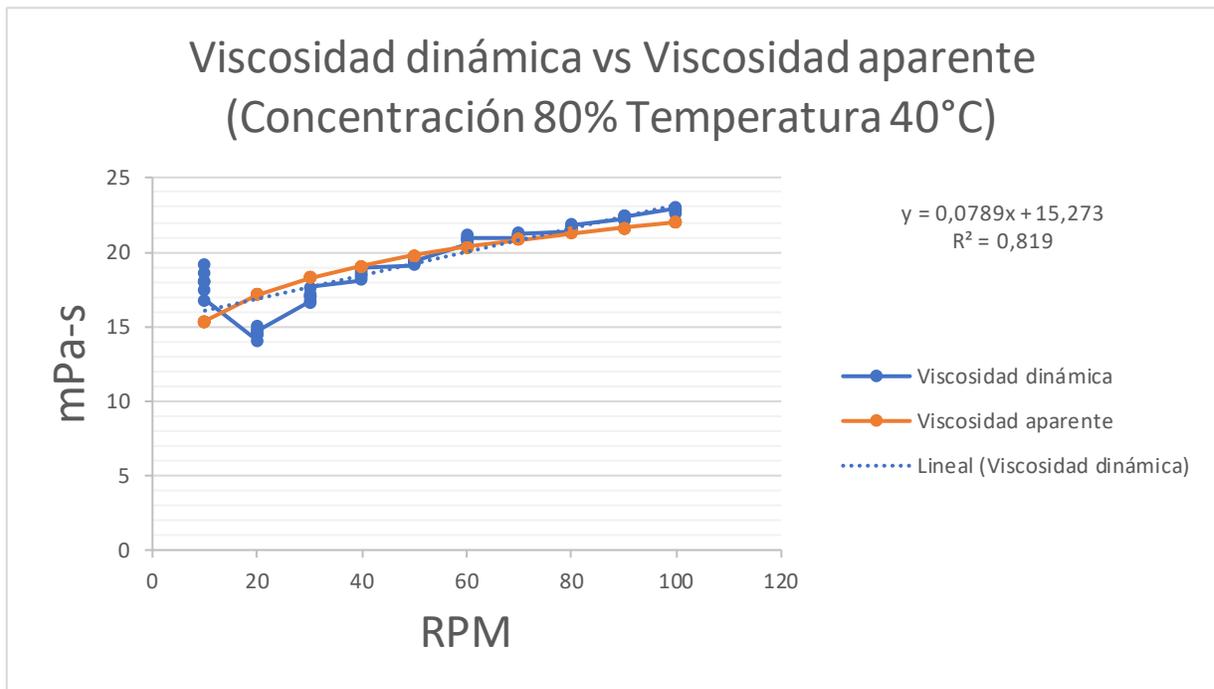
Gráfica 4.69 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 90% Temperatura 50°C)



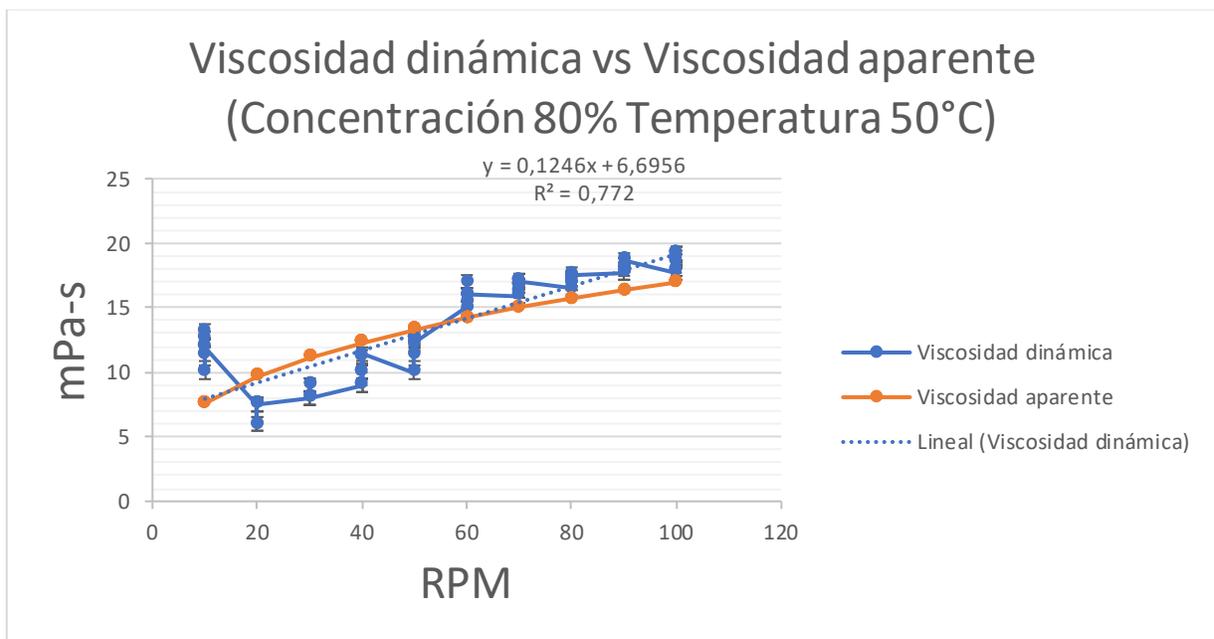
Gráfica 4.70 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 20°C)



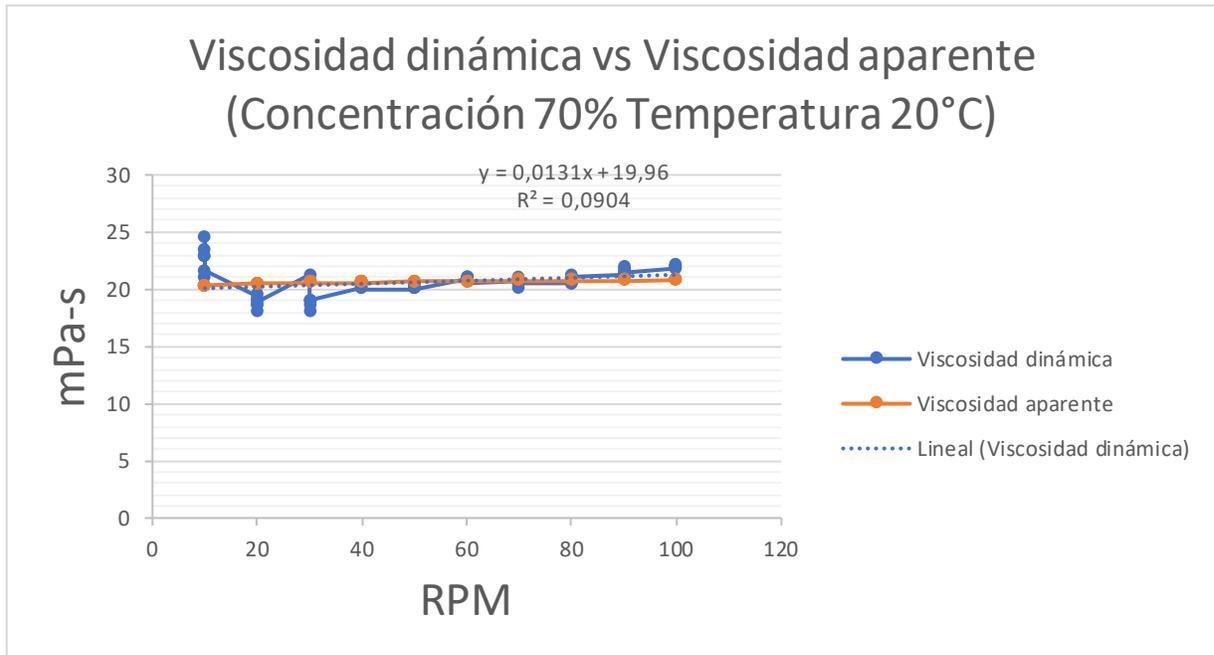
Gráfica 4.71 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 30°C)



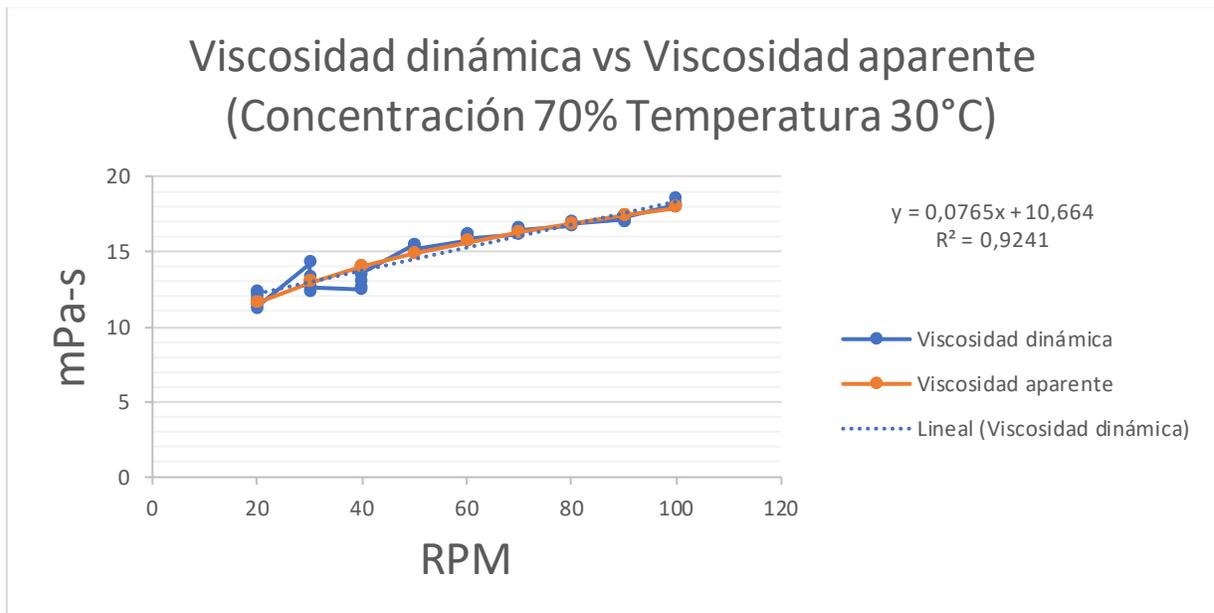
Gráfica 4.72 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 40°C)



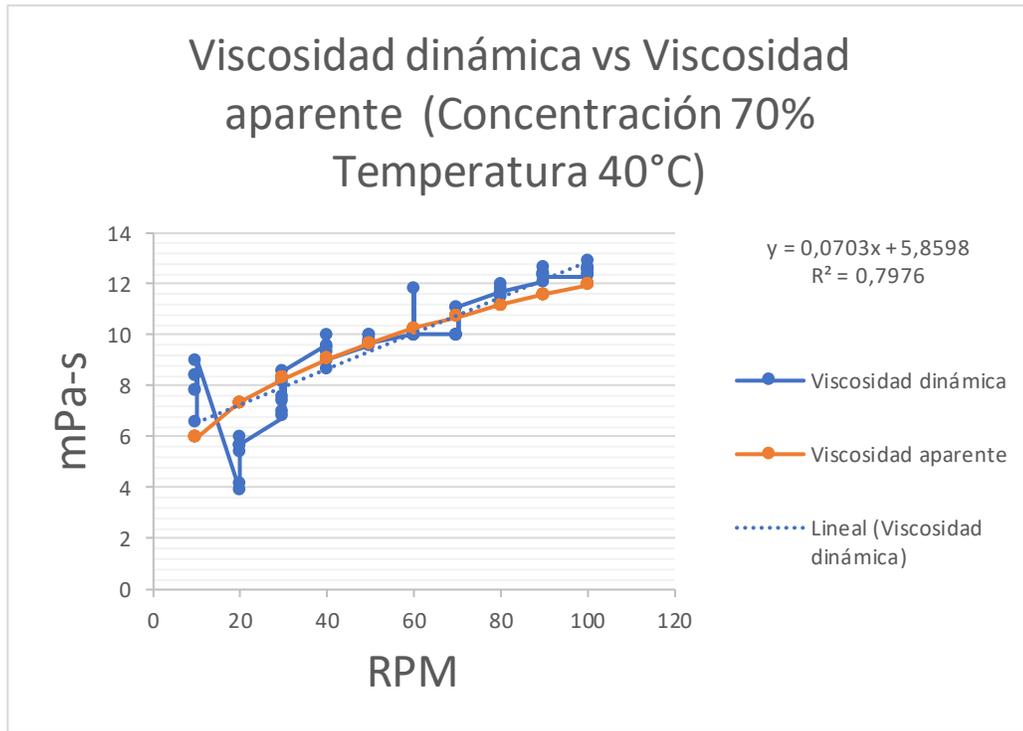
Gráfica 4.73 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 80% Temperatura 50°C)



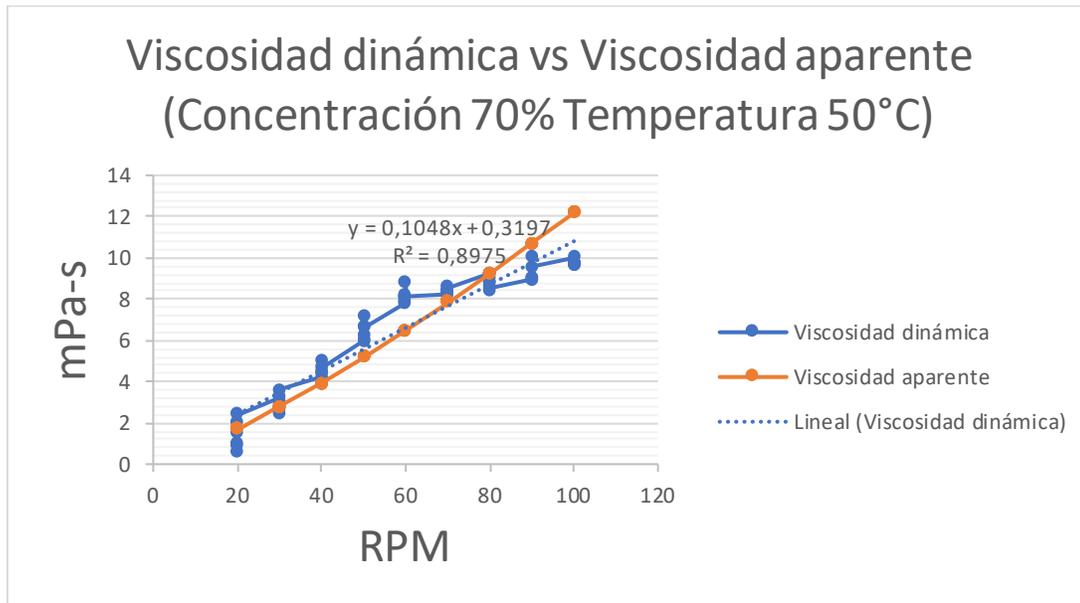
Gráfica 4.74 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 20°C)



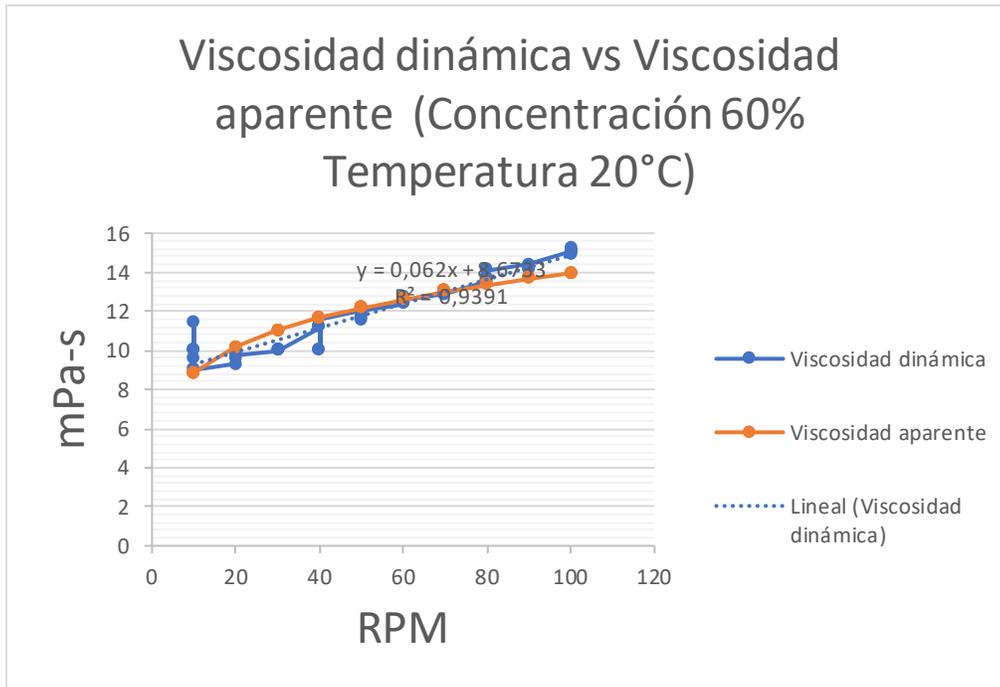
Gráfica 4.75 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 30°C)



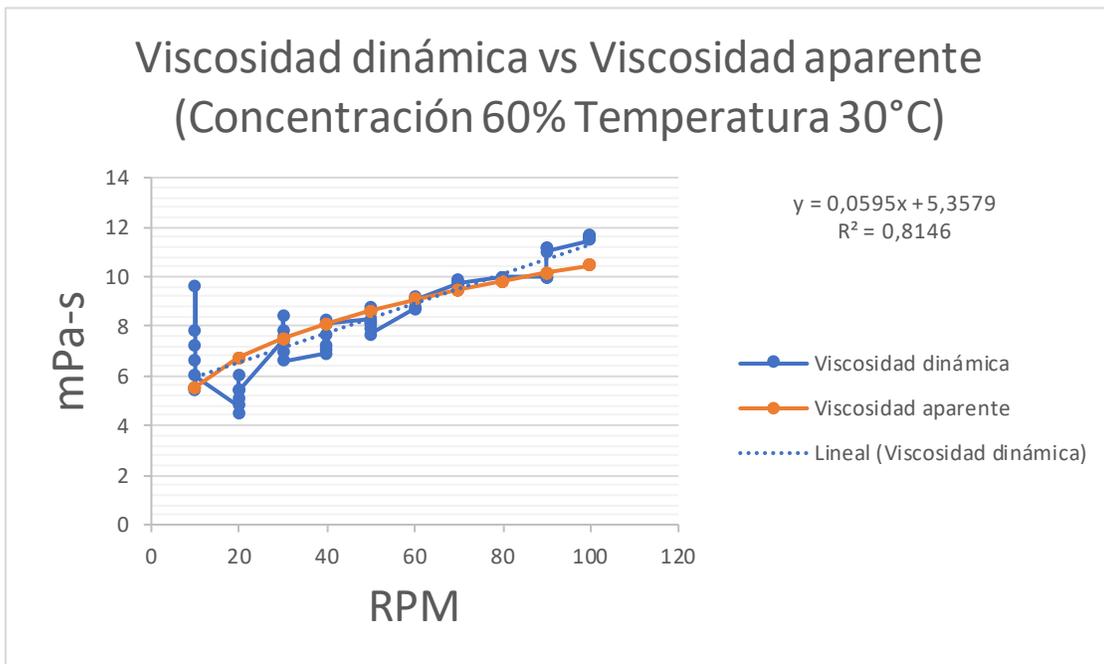
Gráfica 4.76 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 40°C)



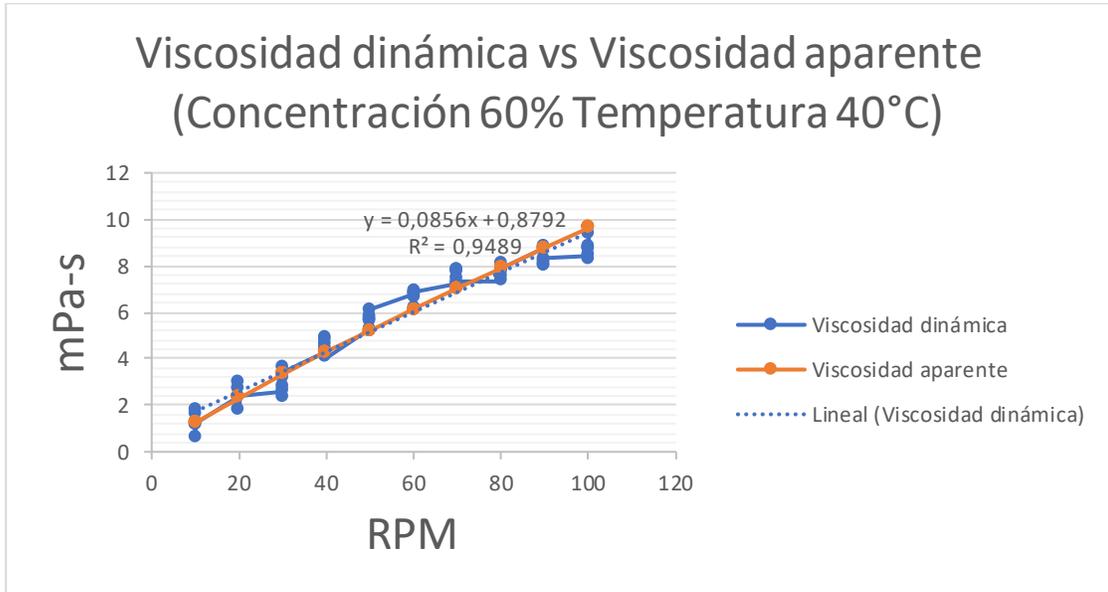
Gráfica 4.77 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 70% Temperatura 50°C)



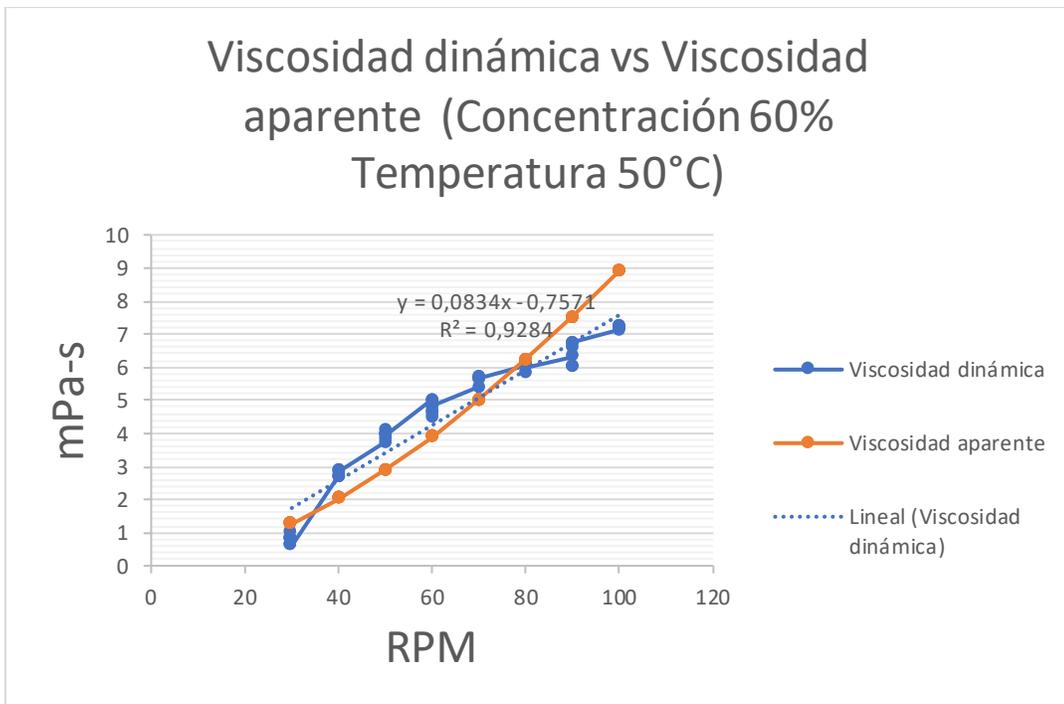
Gráfica 4.78 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 20°C)



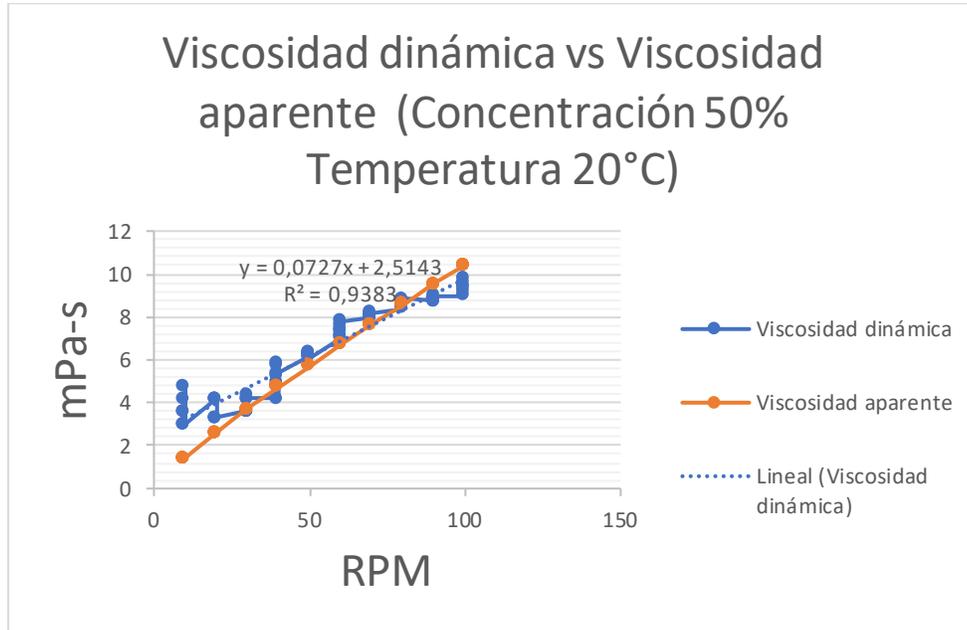
Gráfica 4.79 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 30°C)



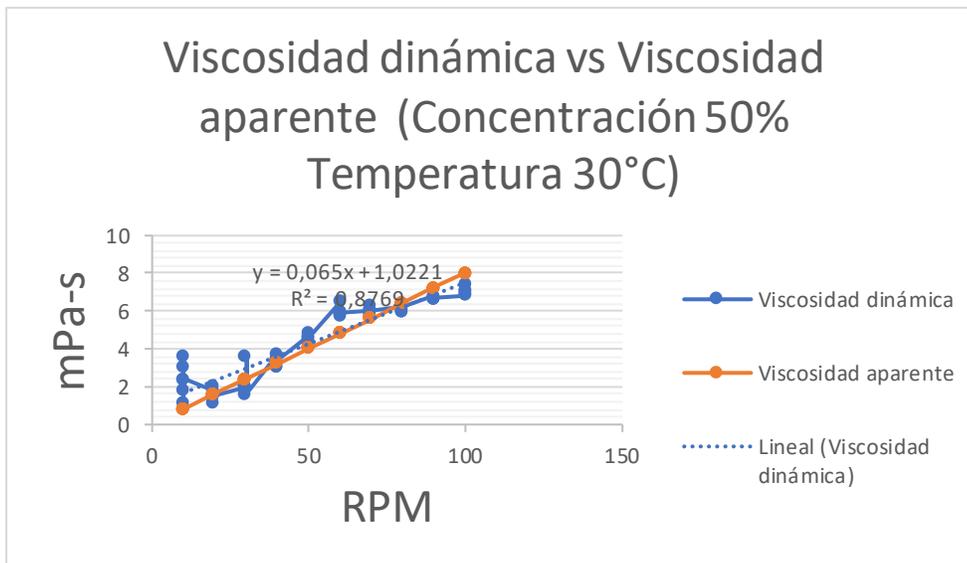
Gráfica 4.80 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 40°C)



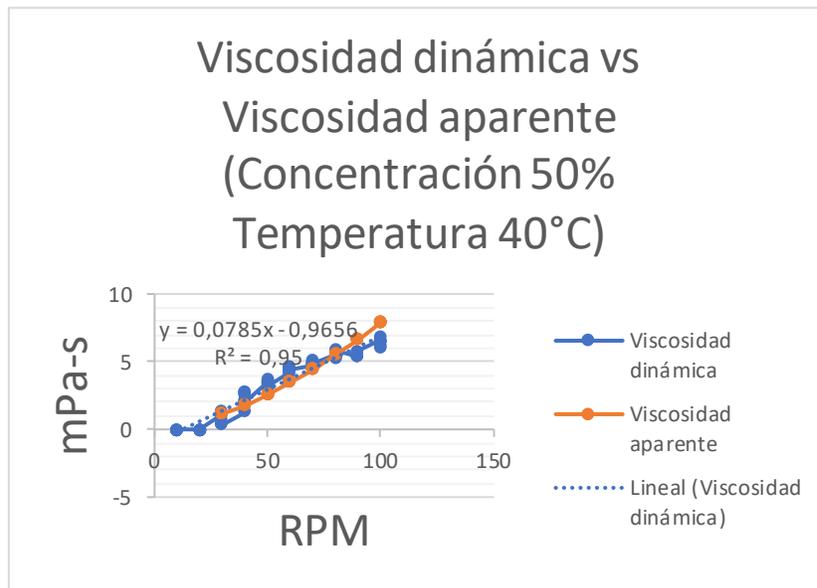
Gráfica 4.81 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 60% Temperatura 50°C)



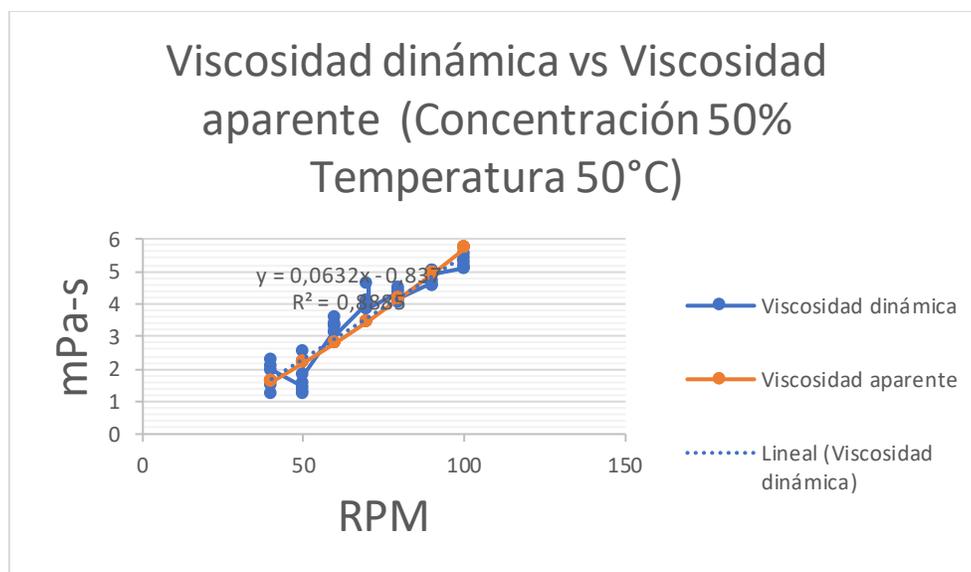
Gráfica 4.82 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 20°C)



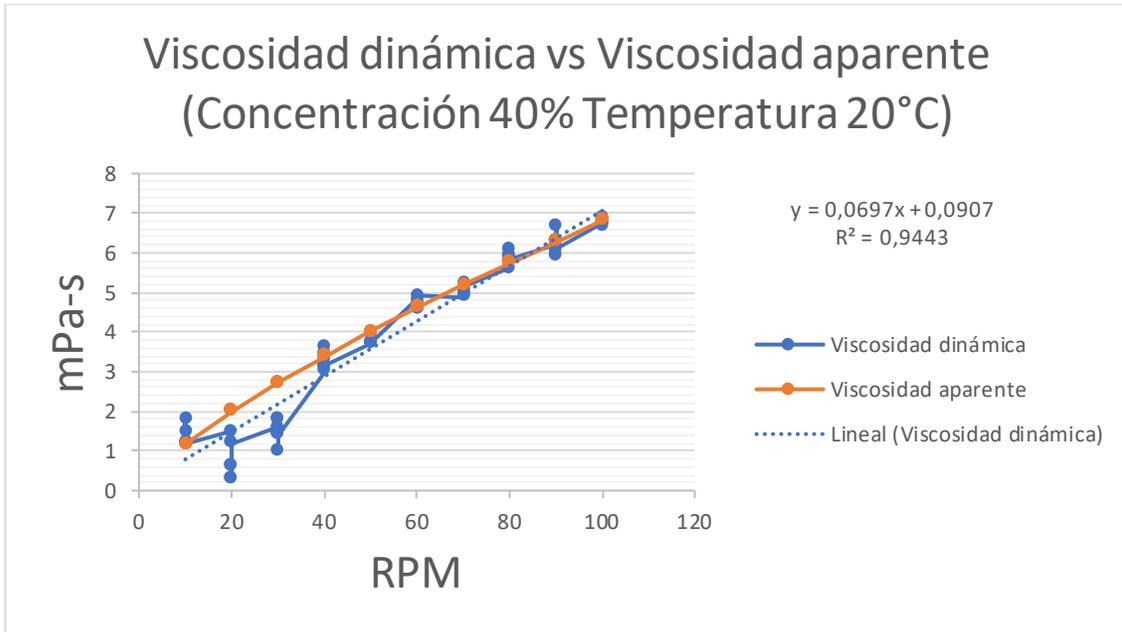
Gráfica 4.83 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 30°C)



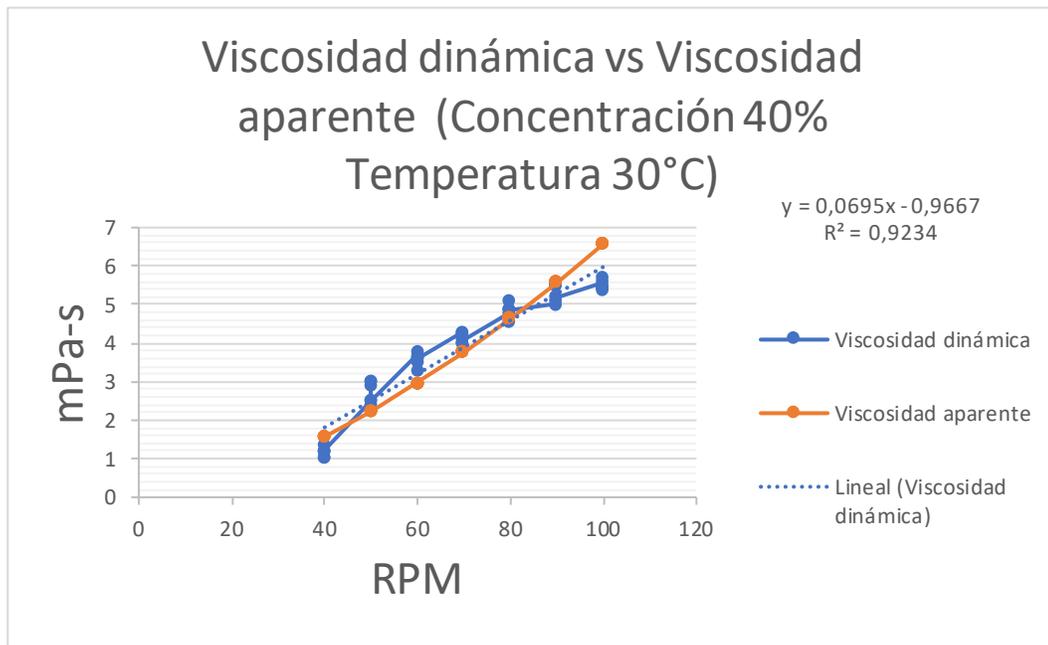
Gráfica 4.84 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 40°C)



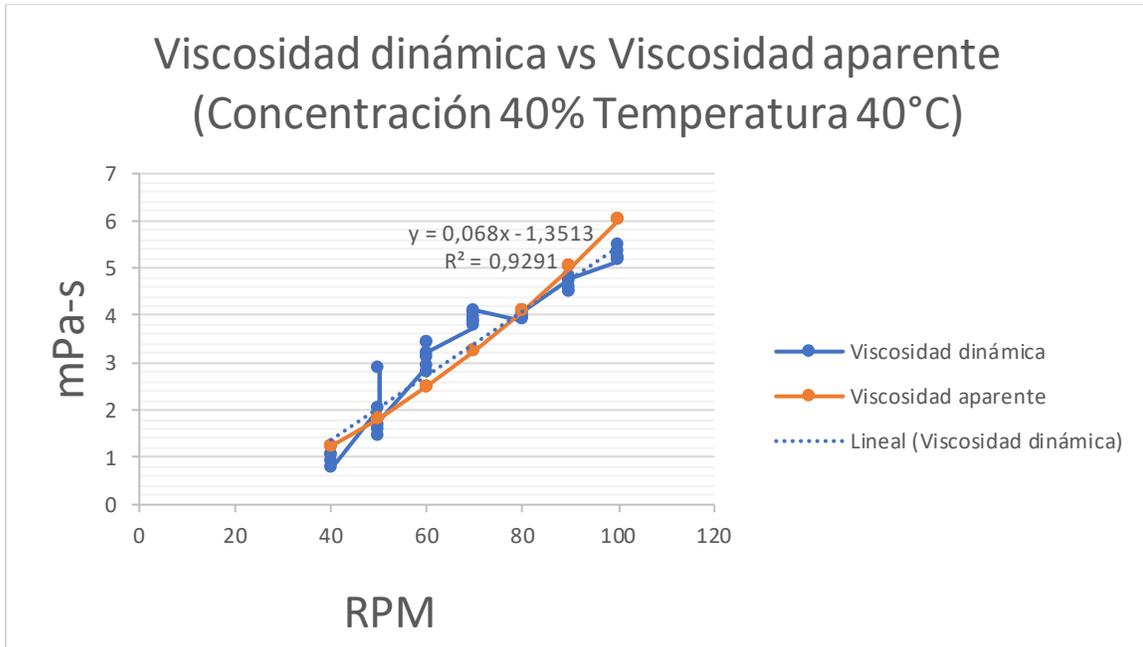
Gráfica 4.85 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 50% Temperatura 50°C)



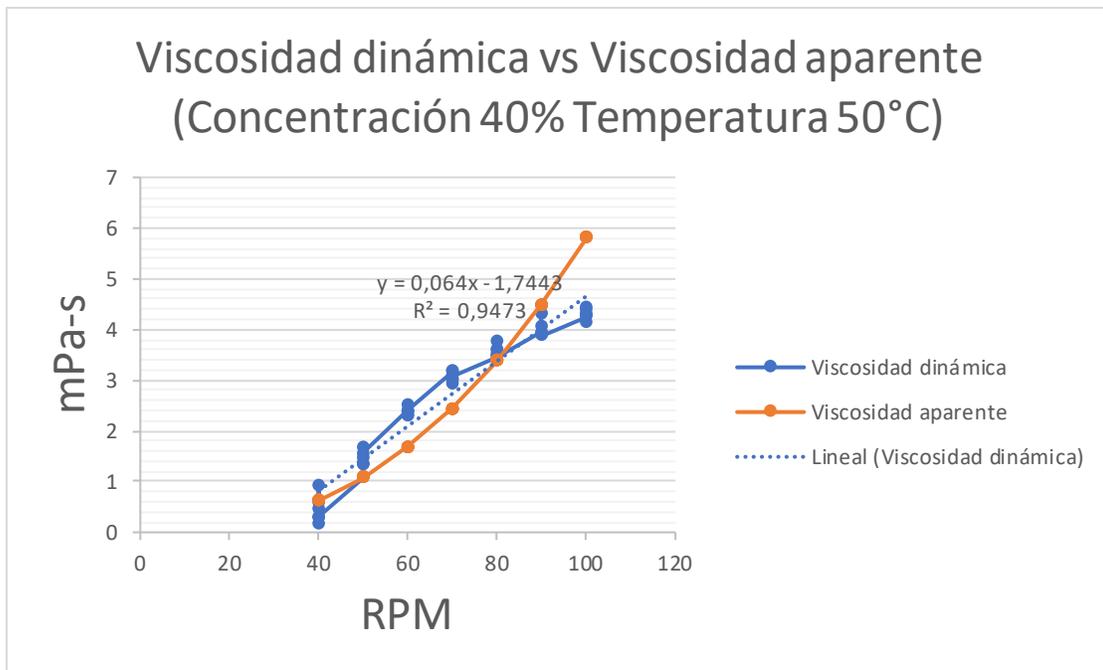
Gráfica 4.86 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 20°C)



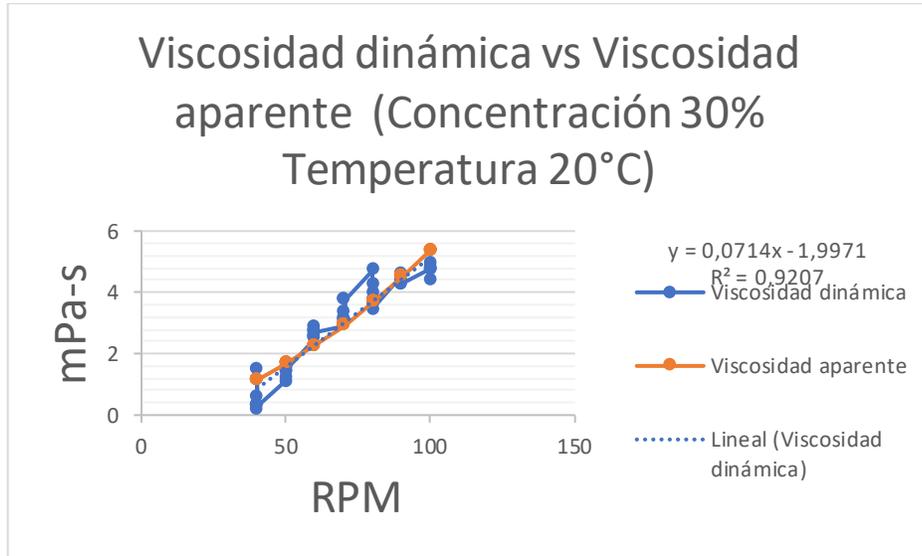
Gráfica 4.87 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 30°C)



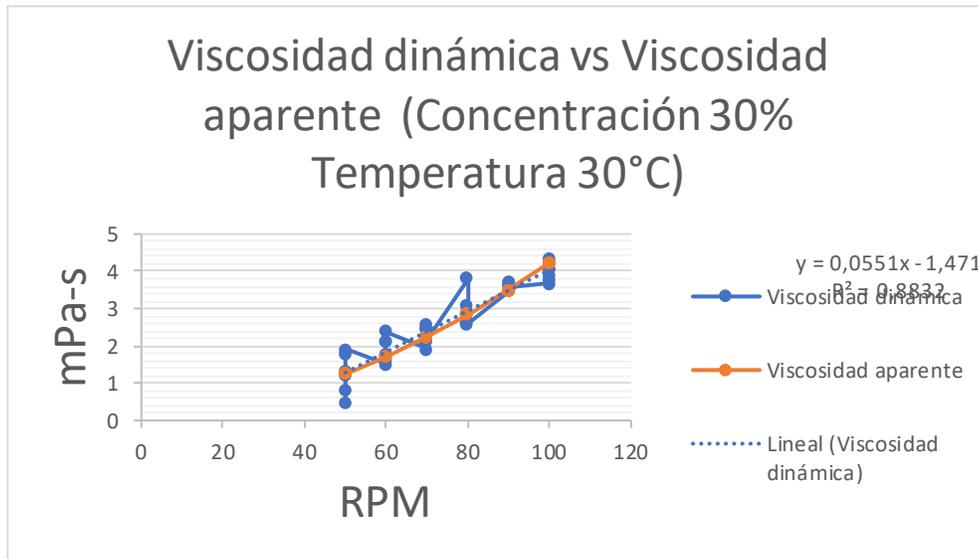
Gráfica 4.88 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 40°C)



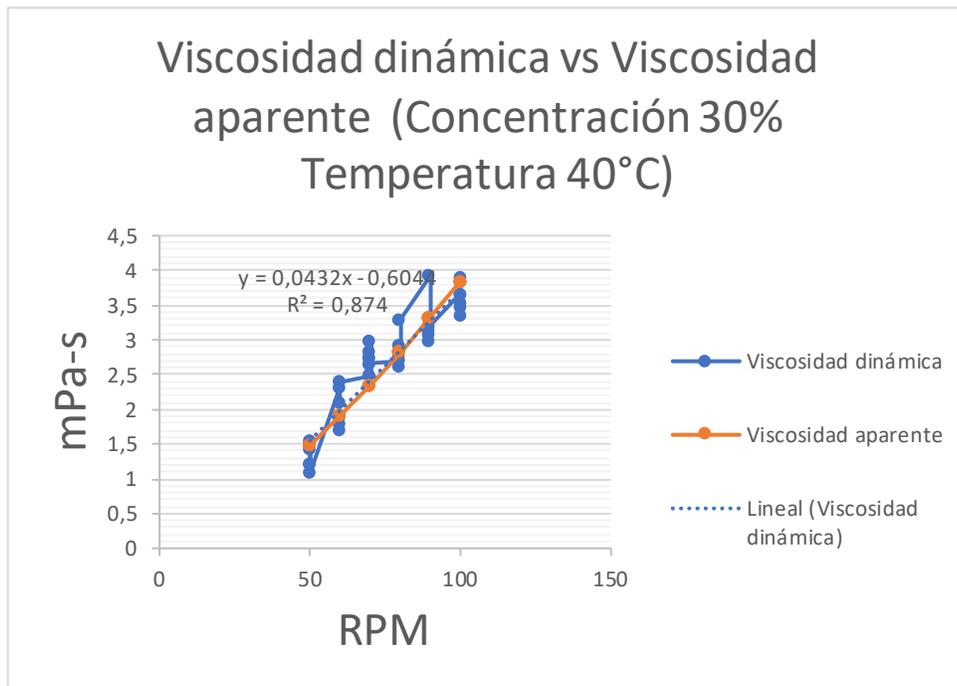
Gráfica 4.89 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 40% Temperatura 50°C)



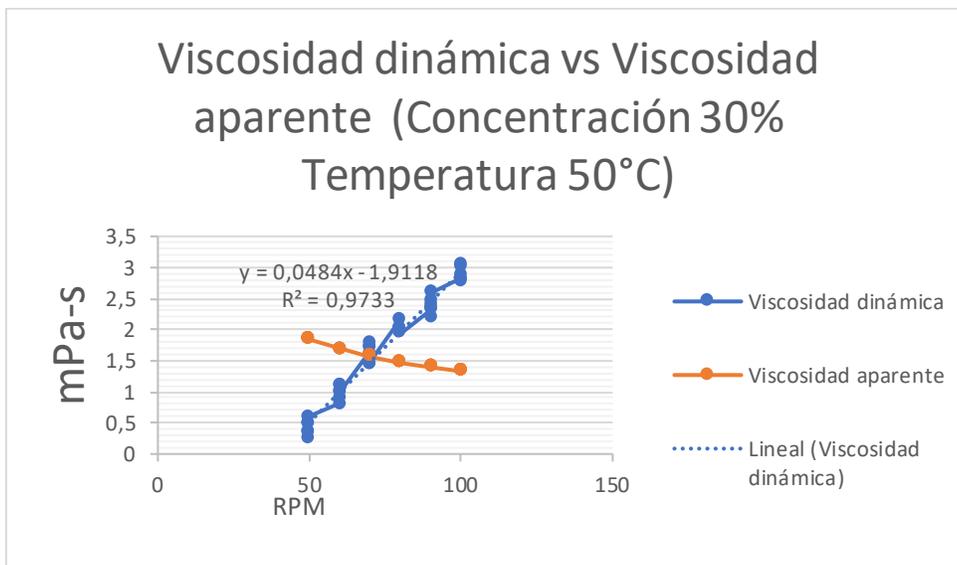
Gráfica 4.90 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 20°C)



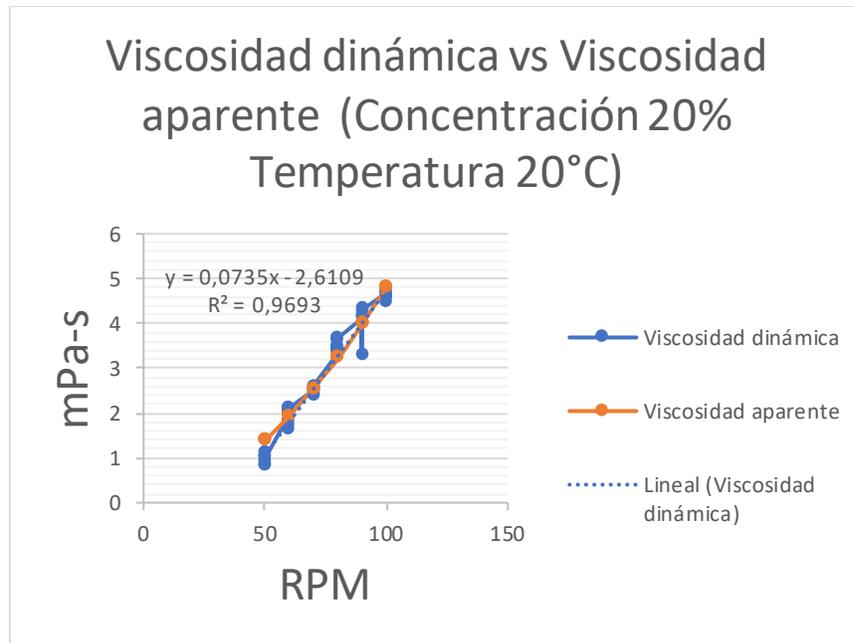
Gráfica 4.91 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 30°C)



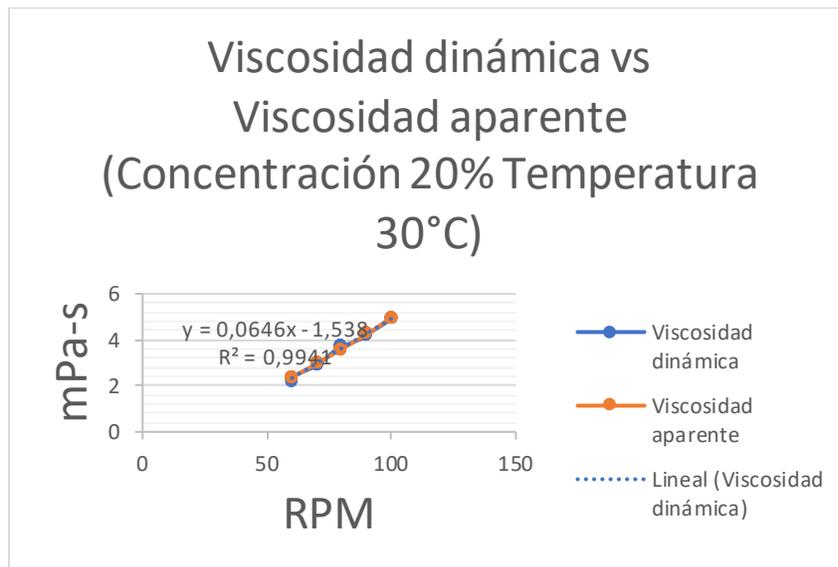
Gráfica 4.92 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 40°C)



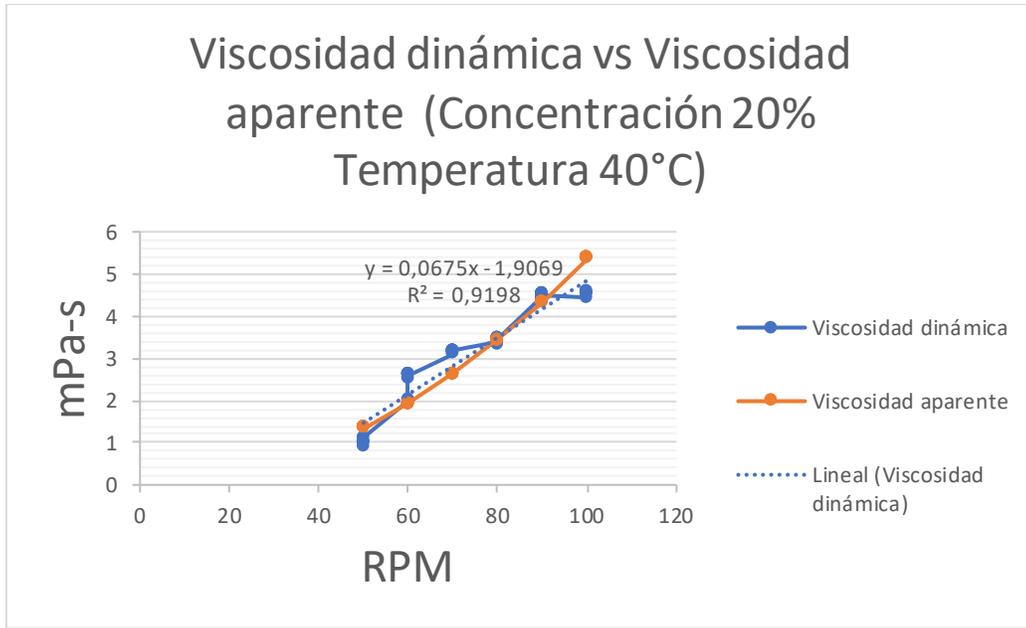
Gráfica 4.93 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 30% Temperatura 50°C)



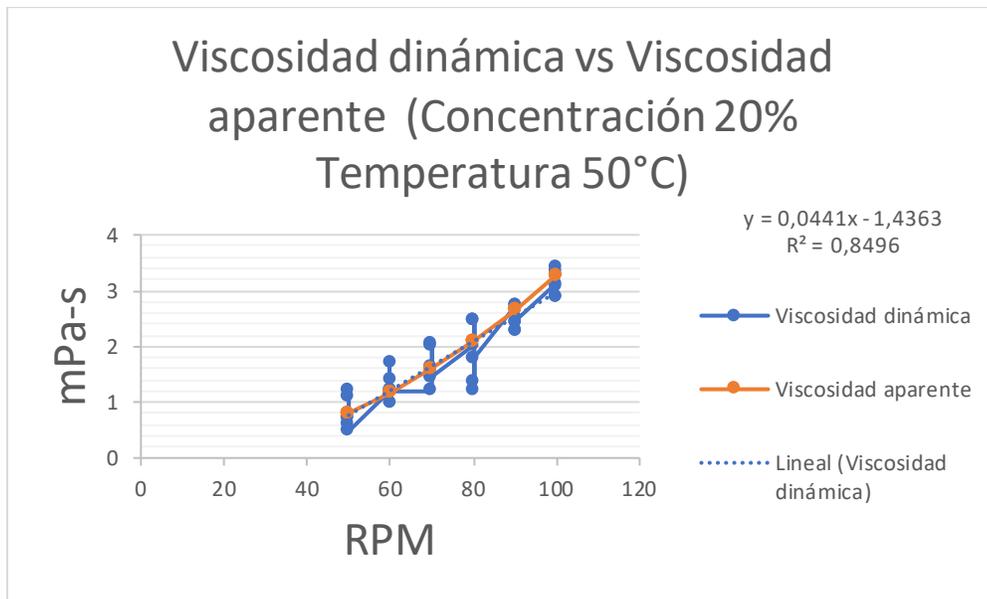
Gráfica 4.94 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 20°C)



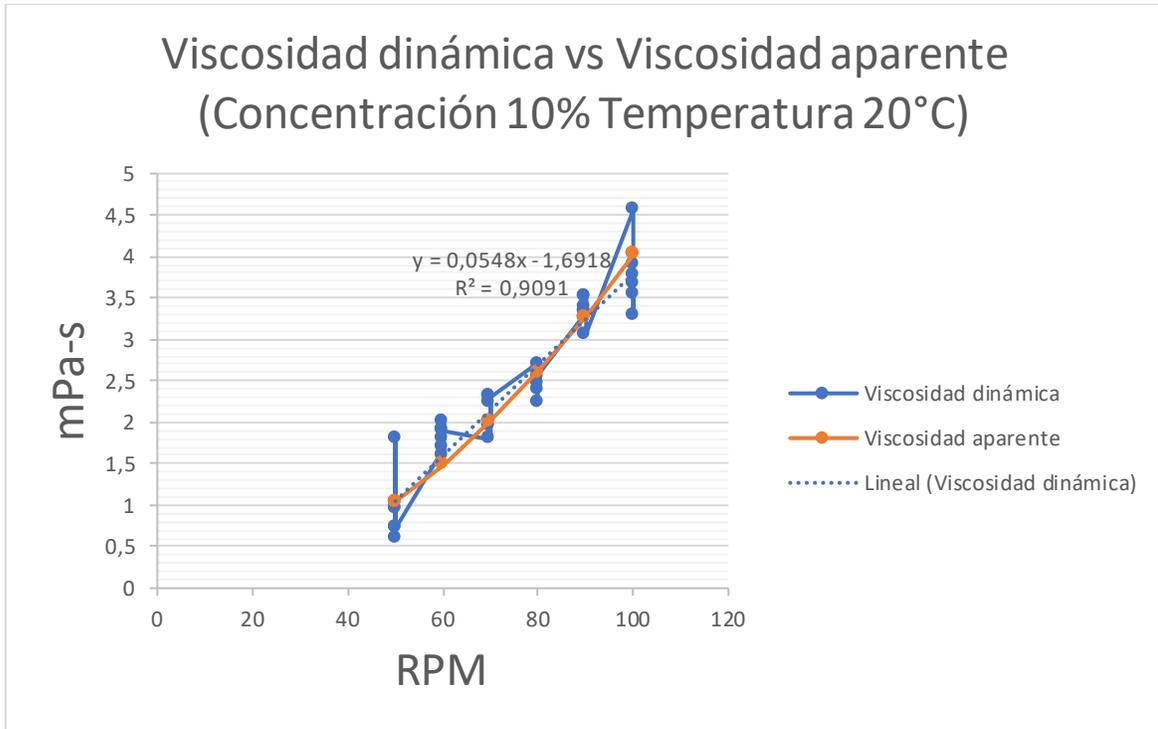
Gráfica 4.95 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 30°C)



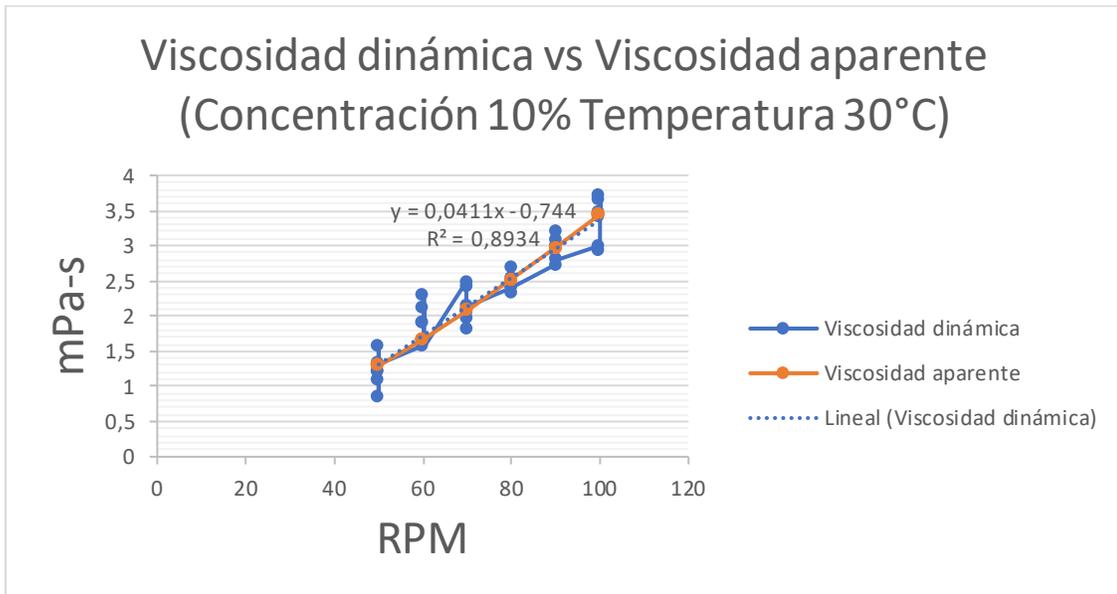
Gráfica 4.96 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 40°C)



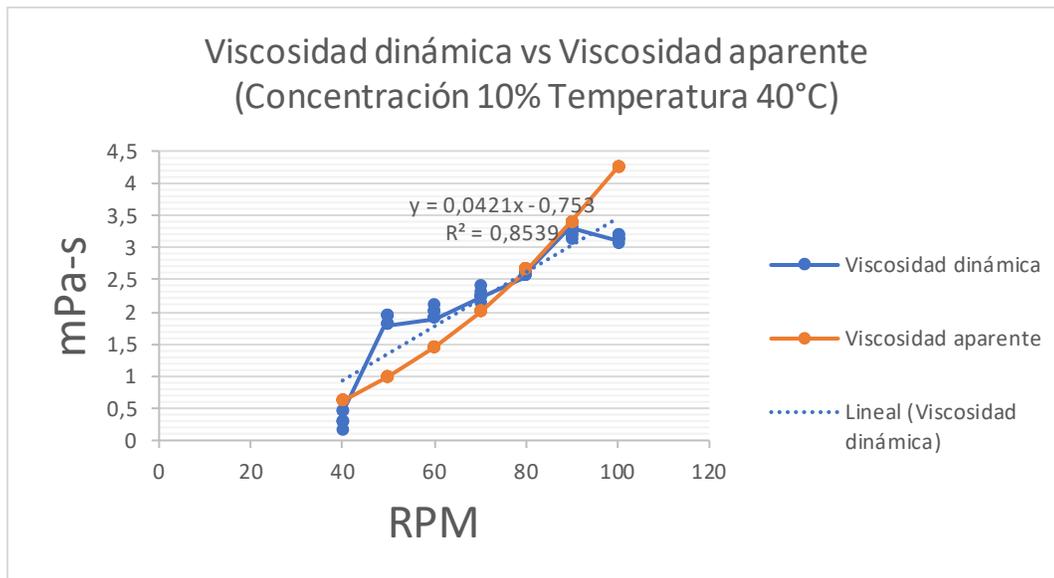
Gráfica 4.97 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 20% Temperatura 50°C)



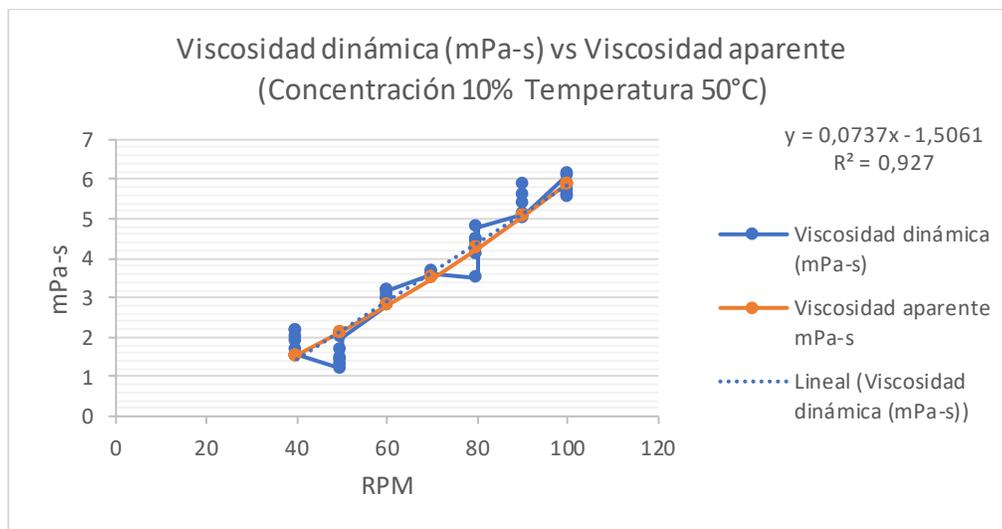
Gráfica 4.98 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 20°C)



Gráfica 4.99 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 30°C)



Gráfica 4.100 Reograma de Viscosidad dinámica vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 40°C)



Gráfica 4.101 Reograma de Viscosidad dinámica (mPa-s) vs Viscosidad aparente (Concentración 10% Temperatura 50°C)